

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra strojů průmyslové dopravy

Studijní program: **M2301 Strojní inženýrství**
Obor: **2302T010 Konstrukce strojů a zařízení**
Zaměření: **Kolové dopravní a manipulační stroje**

OSOBNÍ AUTOMOBIL S ELEKTRICKÝM POHONEM A VODÍKOVÝMI PALIVOVÝMI ČLÁNKY

ELECTRIC DRIVE VEHICLE WITH HYDROGEN FUEL CELLS

KSD – DP – 508

Radek Holubec

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Josef Laurin, CSc.

Konzultant diplomové práce : Ing. Pavel Orendáš, Škoda Auto, a.s., Mladá Boleslav

Rozsah práce:

Počet stran:	54
Počet obrázků:	28
Počet tabulek:	8
Počet grafů:	5
Počet příloh:	6 + 2

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce.

V Liberci dne 26. 5. 2006

Podpis:

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval doc. Ing. Josefu Laurinovi, CSc. za zadání tohoto zajímavého tématu. V neposlední řadě chci poděkovat svým rodičům za podporu během studia.

ANOTACE

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

FAKULTA STROJNÍ

Katedra strojů průmyslové dopravy

Studijní program: M2301 Strojní inženýrství
Autor práce: Radek Holubec
Téma práce: Osobní automobil s elektrickým pohonem a vodíkovými palivovými články
Číslo DP: KSD – DP – 508
Vedoucí DP: doc. Ing. Josef Laurin, CSc.
Konzultant: Ing. Pavel Orendáš, Škoda Auto, a.s., Mladá Boleslav

Abstrakt:

Cílem diplomové práce je komplexní řešení pohonu vozidla s palivovými články na vodík zohledňující nejnovější technické vývojové trendy. Práce je zaměřena převážně na výběr vhodných agregátů a jejich zástavbu do vozidla Octavia Combi. Stanovené provozní parametry navrženého pohonu jsou porovnány se skutečnými vlastnostmi vyráběného vozu.

Abstract:

The aim of the diploma thesis is a complex solution of a driveline of a hydrogen fuel cells vehicle taking into account the latest technical developmental trends. The thesis is mainly focused on a selection of proper aggregates and their build-up into a vehicle Škoda Octavia Combi. Determined operational characteristics of a projected driveline are compared with real qualities of a produced vehicle.

Klíčová slova: palivové články, vodík, asynchronní motor, invertor, nádrže na vodík.

Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů:	9
Seznam použitých veličin:	9
1 Úvod.....	11
2 Možnosti pohonu osobních automobilů elektromotory napájenými z palivových článků na vodík:	12
2.1 Nové možnosti konstrukce vozidel:.....	12
2.1.1 Druhy palivových článků:.....	12
2.1.2 Způsoby uskladnění vodíku:	13
2.2 Přehled možných uspořádání:	14
2.2.1 Přehled variant A, B, C a D	15
3 Projekt.....	18
3.1 Výběr vhodné varianty pro automobil Škoda OCTAVIA COMBI.....	18
3.2 Volba jednotlivých agregátů	19
3.2.1 Asynchronní motor	21
3.2.2 Palivové články na vodík	23
3.2.3 Invertor.....	27
3.2.4 Akumulační prvek.....	27
3.2.5 Palivové nádrže.....	33
3.3 Návrh převodového ústrojí	35
3.3.1 Návrh stálého převodu:	36
3.3.2 Konstrukce převodovky	36
3.3.3 Vlastnosti převodovky	37
3.4 Zástavba agregátů	39
3.4.1 Motorový prostor	39
3.4.2 Zavazadlový prostor	40
3.5 Odhad hmotnosti vozidla	41
4 Stanovení očekávaných provozních parametrů vozidla.....	42
4.1 Stanovení spotřeby paliva a dojezdu	43
4.2 Stanovení maximální rychlosti	47

4.3	Stanovení maximálního zrychlení	49
4.4	Stanovení maximální stoupavosti	51
5	Závěr	53
	Seznam použité literatury:	54

Seznam použitých zkratek a symbolů:

PSM	P ístový S palovací M otor
PEM	P roton E xchange M embrane (Iontoměničná membrána)
PEM FC	P roton E xchange M embrane F uel C ells (Palivové články s iontoměničnou membránou)
MEA	M embrane E lectrode A ssembly (Membránové uskupení pal. článků typu PEM)
MCFC	M olten C arbonate F uel C ells (Palivové články s tavenými karbonáty)
SOFC	S olid O xide F uel C ells (Palivové články s pevnými oxidy)
AFC	A lkaline F uel C ells (Alkalické palivové články)
PAFC	P hosphoric A cid F uel C ells (Kyselé palivové články)
DMFC	D irect M ethanol F uel C ells (Přímé metanolové palivové články)
PM	P ermanentní M agnety
PÚ	P řevodové Ú strojí
IGBT	I nsulated G ate B ipolar T ranzistor (Bipolární tranzistor s izolovaným hradlem)
rpm	R evolutions P er M inute (Otáčky za minutu)
AM	A synchronní M otor
PP	P lanetová P řevodovka
D	D iferenciál

Seznam použitých veličin:

u_{skut}	[V]	Skutečné napětí při zatížení přepočtené na jeden článek
u_{teor}	[V]	Teoretické napětí naprázdno přepočtené na jeden článek
E_{kin}	[J]	Kinetická energie
s_{zv}	[1]	Skluz zvratu
s	[1]	Skluz
n_s	[rpm]	Synchronní otáčky
P_{max}	[kW]	Maximální výkon

E_{kin}	[J]	Kinetická energie
U_{nom}	[V]	Nominální napětí
R_{celk}	[Ω]	Celkový odpor
C_{celk}	[F]	Celková kapacita
η_{pm}	[1]	Součin účinnosti motoru a převodovky
g	[m/s^2]	Gravitační zrychlení
v_0	[m/s]	Počáteční rychlost
f	[1]	Součinitel valivého odporu
F_o	[1]	Odpor valení
F_a	[N]	Aerodynamická síla
F_b	[N]	Brzdná síla
i_{stal}	[1]	Převodový poměr stálého převodu
i_{plan}	[1]	Převodový poměr planetové převodovky
M_P	[Nm]	Moment na pravém kole
M_L	[Nm]	Moment na levém kole
F_{KP}	[N]	Hnací síla na pravém kole
F_{KL}	[N]	Hnací síla na levém kole
M_{gyr}	[Nm]	Gyroskopický moment
I_{mot}	[$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]	Moment setrvačnosti motoru
ω_m	[rad/s]	Úhlová rychlost motoru
ω_u	[rad/s]	Unášivá úhlová rychlost
ξ	[1]	Součinitel rotačních hmot
ρ_v	[kg/m^3]	Hustota vzduchu
c_x	[1]	Součinitel odporu vzduchu
S_x	[m^2]	Čelní plocha automobilu

1 Úvod

V dnešním světě si život již neumíme představit bez nejrůznějších technických vynálezů, jejichž denní používání si v této přetechizované době ani neuvědomujeme. Avšak jejich výroba a používání má za následek spotřebu menšího či většího množství energie. Se spotřebou této energie, ale úzce souvisí její získávání. Lidstvo nyní získává více než 90% celkové energie z fosilních paliv, jejichž zásoba je odhadována při současném nárůstu spotřeby na 50 let. Z tohoto stavu vyplývají tři závažné problémy: problém se získáváním energie po vyčerpání těchto paliv, ekologický problém zapříčiněný jejich používáním a také problém vzniklý ztrátou surovin, které by mohly být v budoucnu nepostradatelné pro výrobu některých produktů (plasty, léčiva, textilie...).

Jedním z řešení této situace je výrazné snížení spotřeby energie, což při uvážení faktu, že 17% populace spotřebuje více než 60% energie, není možné. Jediným východiskem pro lidstvo tedy bude nalezení ekologického způsobu získávání velkého množství energie. Zatím známé způsoby (vodní, větrné a solární elektrárny, spalování biomasy...) nebudou možná pokrývat stále rostoucí spotřebu energie. Proto se vědci snaží najít mnohem výkonnější a levnější způsoby výroby velkého množství energie. Jedním z možných způsobů se dnes zdá výroba energie pomocí termionukleární reakce (jaderné fúze). Ta však probíhá za takových podmínek (vysoké teploty a tlaky), které nejsme zatím schopni na Zemi udržet neomezeně dlouhou dobu.

Další otázkou je jak s touto energií nakládat a jak ji skladovat. V případě stacionárních spotřebičů nevznikne velký problém, protože se vzniklá energie (nejčastěji tepelná) převede na energii elektrickou a tu můžeme distribuovat pomocí stávající rozvodné sítě. Problém však nastane v případě mobilních spotřebičů (zejména dopravních prostředků), u nichž dodnes byla v převážné míře řešena zásoba energie potřebné k provozu nádržemi s fosilními palivy. Zatím nejvhodnějším nástupcem fosilních paliv v tomto oboru se zdá být vodík. Při spalování vodíku v současných PSM jsou jedinými škodlivými emisemi NO_x. Dalším způsobem jak vodík v dopravních prostředcích využít je přeměnit ho pomocí vodíkových palivových článků na elektrickou energii a tu přeměnit pomocí elektromotoru na energii mechanickou. Touto možností se budu zabývat v mé diplomové práci.

2 Možnosti pohonu osobních automobilů elektromotory napájenými z palivových článků na vodík:

2.1 Nové možnosti konstrukce vozidel:

Konstrukce vozidel s palivovými články na vodík je díky novým možnostem uspořádání jednotlivých agregátů velice rozmanitá. Možnost více kombinovat při zástavbě agregátů je také dána velikou variabilitou jejich rozměrů. Například použití dlouhých a nízkých baterií do podlahy vozu nebo libovolné poměry výšky, šířky a délky palivových článků, které si určí jejich odběratel (automobilový závod) a které jsou velice dobře měnitelné počtem a velikostí membrán, případně jejich zapojením. Velikým rozdílem od nynější konstrukce bude také možnost použití několika (nejčastěji jednoho až čtyř) elektromotorů. Také vodíkové nádrže budou ve velmi různých provedeních co se týče velikosti a počtu. Dnes přicházejí v úvahu tři způsoby uskladnění čistého vodíku viz kapitola 2.1.2.

2.1.1 Druhy palivových článků:

Některé druhy palivových článků jsou zejména z důvodu vysoké teploty reakce pro použití ve vozidlech nevhodné, proto uvedu pouze jejich velmi stručný přehled. Typy palivových článků se liší především použitým elektrolytem, který určuje provozní teplotu.

Vysokoteplotní palivové články:

- Palivové články s elektrolytem na bázi tekutých uhličitů (MCFC);
- palivové články s elektrolytem na bázi tuhých (pevných) oxidů (SOFC).

Výhodou vysokoteplotních článků je, že vysoká teplota umožňuje za přítomnosti vody samovolný vnitřní reforming (přeměnu) lehkých uhlovodíkových paliv jako je metan na vodík a uhlík. Proto je možné přímo použít i jiných paliv než je čistý vodík.

Nízkoteplotní palivové články:

- Alkalické palivové články (AFC);
- palivové články s elektrolytem na bázi kyseliny fosforečné (PAFC);
- palivové články s přímým zpracováním methanolu (DMFC);

- palivové články s iontoměničnou membránou (PEM FC).

V tomto případě je elektrolyt nahrazen iontoměničnou membránou, což se ukazuje jako velmi výhodné pro použití ve vozidlech (cena, životnost, účinnost ...).

Podrobněji o palivových článcích viz příloha 1.

2.1.2 Způsoby uskladnění vodíku:

Uskladnění v tlakových nádobách (obrázek 2.1)

Výhody:

- málo energeticky náročné;
- jednoduchost (nižší cena);
- vodík může být v nádržích libovolně dlouhou dobu.

Nevýhody:

- velké rozměry (malá energetická hustota vodíku v plynném stavu => nutnost stlačení až na 70 MPa);
- nebezpečí úniku vodíku při nehodě.

Uskladnění kapalného vodíku v kryo-nádržích (obrázek 2.2)

Výhody:

- Velká energetická hustota.

Nevýhody:

- Velká energetická náročnost na zkapalnění vodíku (teplota varu je 20.390 K při 0.1013 MPa);
- nebezpečí úniku vodíku při nehodě;
- únik vodíku pojistnými ventily v případě zvýšení tlaku v nádrži vlivem ohřátí vodíku na bod varu.

Uskladnění vodíku ve formě sloučenin:

výhody:

- Nejvyšší bezpečnost uložení vodíku.

nevýhody:

- v případě použití kovových materiálů (Palladium, hořčík, nikl, železo, titan...) je nevýhodou vysoká hmotnost a pořizovací cena

Princip je založen na absorpci vodíku určitým materiálem: a) kovovým (Metalhydridy)

b) nekovovým (Uhlík)

ad a) Absorpce probíhá za vysokého tlaku a mírné teploty. Uvolnění vodíku probíhá při zvýšené teplotě a nízkém tlaku.

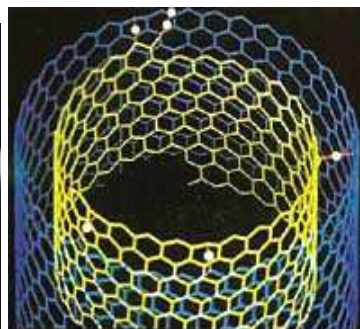
ad b) Tento způsob uskladnění se může v budoucnu stát revoluční. Dnes bohužel není ještě dostatečně prozkoumán. Principem je pohlčení vodíku materiálem na uhlíkovém základě s mikroskopickou strukturou viz obrázek 2.3



Obrázek 2.1



Obrázek 2.2



Obrázek 2.3

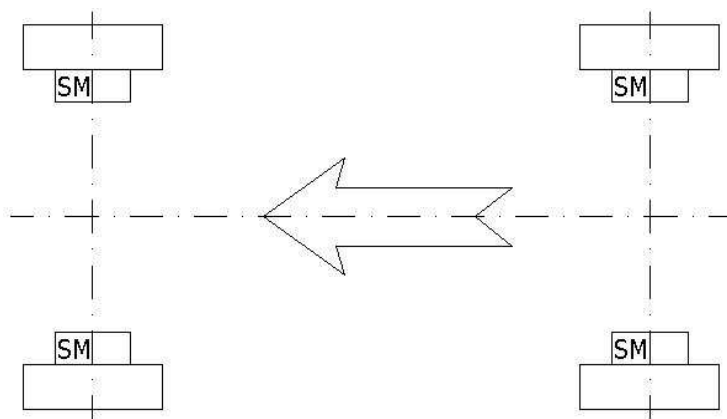
2.2 Přehled možných uspořádání:

Nejpodstatnější podíl v rozdílech mezi jednotlivými uspořádáními agregátů má z důvodu mechanického přenášení výkonu na kola uspořádání a volba elektromotorů. Další agregáty nevyžadují pro svůj provoz speciální umístění ve vozidle. Proto musí jejich zástavba podléhat zástavbě elektromotorů. Z tohoto důvodu uvádím pouze některé varianty rozmístění elektromotorů. První dvě varianty se používají v již vyrobených prototypech vozů. Přehled těchto vozů je dobře zpracován na internetových stránkách: www.h2mobility.org

S variantami C a D jsem se doposud nesetkal. Uvádím je především kvůli tomu, že mi připadají pro použití v sériové výrobě velice výhodné. Varianta C je nejjednodušší a nejlevnější z uvedených, proto si myslím, že bude v sériově vyráběných vozech nižší třídy jednou z nejpoužívanějších. Varianta D v principu vychází z varianty C a rozšiřuje její možnosti elektrického pohonu. Tato varianta možná najde uplatnění ve vozech s vyšší maximální rychlostí.

2.2.1 Přehled variant A, B, C a D

A) Synchronní motory ve všech kolech



Obrázek 2.4

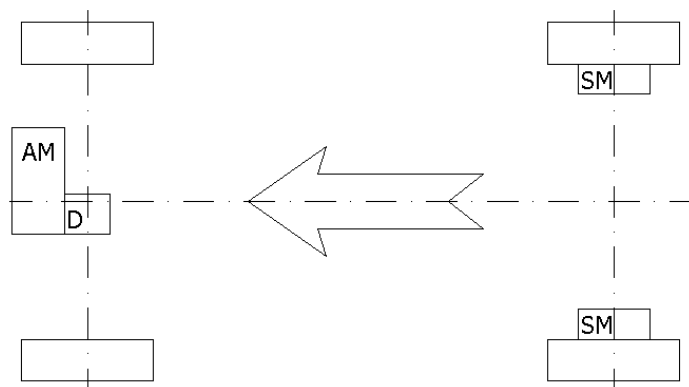
Výhody:

- Vozidlo může využívat hnacích sil na mezích adheze všech kol;
- není zapotřebí převodového ústrojí;
- dobrá zástavba.

Nevýhody:

- Velké neodpružené hmoty na všech kolech;
- vysoká cena, která je dána nutností použití synchronních motorů s PM na bázi vzácných zemin;
- nižší účinnost motorů při vysokých otáčkách zapříčiněná vznikem vířivých ztrát ve statoru (velká vzduchová mezera).

B) Přední náprava hnaná asynchronním motorem a zadní kola synchronními motory



Obrázek 2.5

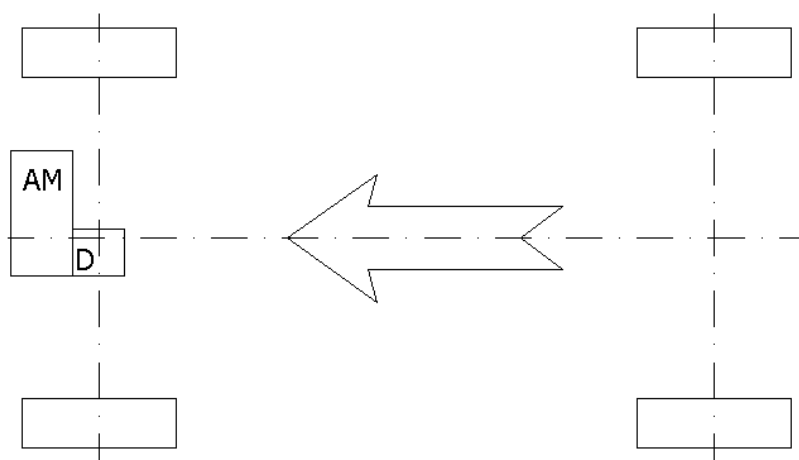
Výhody:

- Velmi dobrý přenos hnací síly;
- není zapotřebí převodového ústrojí.

Nevýhody:

- Velké neodpružené hmoty na zadních kolech;
- další nevýhody související s použitím synchronních motorů jako ve variantě A.

C) Přední náprava hnaná asynchronním motorem. Pouze se stálým převodem.



Obrázek 2.6

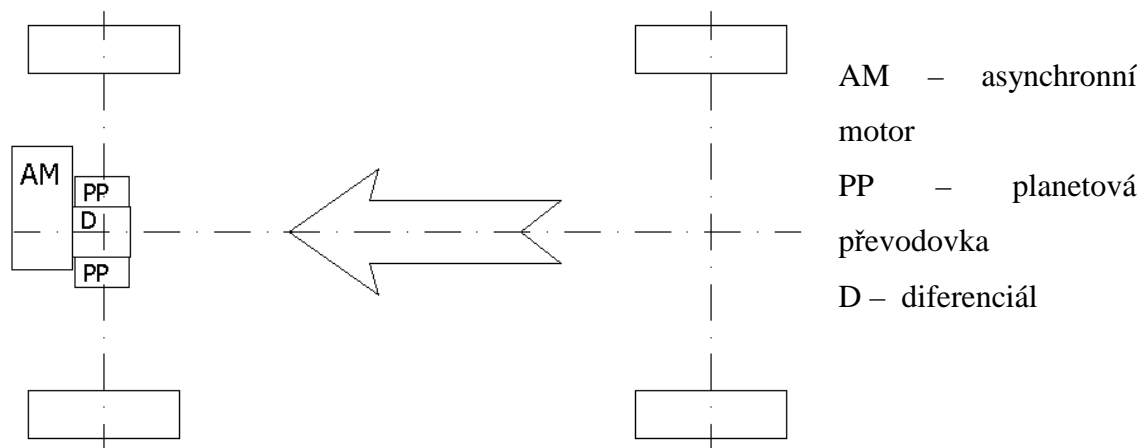
Výhody:

- Velmi jednoduché uspořádání s možností použití stejných součástí od kol po diferenciál jako u současných automobilů;
- nejlevnější ze všech uvedených variant.

Nevýhody:

- Nejhorší možnost přenosu hnací síly ze všech variant (stejná jako u většiny současných vozů);
- nutnost volit díky absenci PÚ kompromis mezi maximální stoupavostí a maximální rychlostí.

D) Přední náprava hnaná asynchronním motorem. Dvě planetové převodovky na výstupech z diferenciálu.



Obrázek 2.7

Výhody:

- Lepší přenos síly než u varianty C;
- PÚ umožňuje dosažení vyšší stoupavosti vozidla bez nutnosti snížení maximální rychlosti vozidla zvýšením převodového poměru stálého převodu;
- přijatelná cena.

Nevýhody:

- Podstatně horší přenos hnací síly na vozovku než u variant A a B.

3 Projekt

Při vypracování projektu vozidla s palivovými články na vodík nejdříve vyberu vhodné uspořádání pohonu z variant uvedených v kapitole 2.2.1. Následně se budu zabývat výběrem vhodných agregátů. Při tomto výběru budu vycházet z technických parametrů automobilu OCTAVIA COMBI tak, aby žádný z parametrů (stoupavost, maximální výkon a maximální rychlost) nebyl u navrženého pohonu výrazně nižší než u nejslabší motorové verze vyráběného vozu. Dále budu brát ohled na vyváženost jednotlivých agregátů a na množství technických informací, které výrobci k těmto agregátům poskytují.

V další části projektu se budu zabývat návrhem převodového ústrojí a zástavbou agregátů do vozidla.

3.1 Výběr vhodné varianty pro automobil Škoda OCTAVIA COMBI

Tabulka 3.1

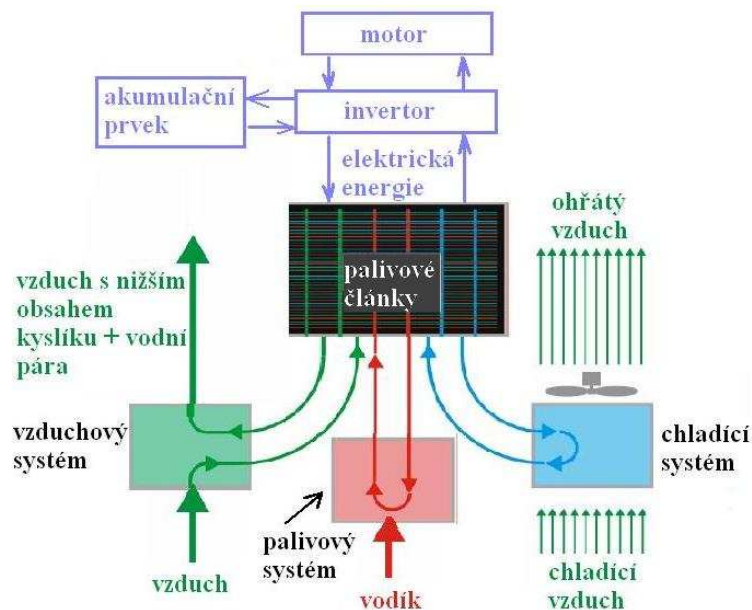
Posuzované vlastnosti	Váhový součinitel	Varianta A	Varianta B	Varianta C	Varianta D
Přenos hnací síly na vozovku	0,25	100	80	35	45
Neodpružené hmoty	0,15	0	50	100	100
Zástavba	0,15	80	60	50	50
Účinnost pohonu	0,15	70	75	80	80
Cena	0,3	25	40	80	75
Výsledek	1	55	59,75	67,25	68,25

Váhové součinitele a bodové hodnocení v této tabulce jsem odhadl, proto se výsledky nemusejí shodovat s jinými názory. Volba váhových součinitelů a hodnocených vlastností je závislá především na typu vozidla.

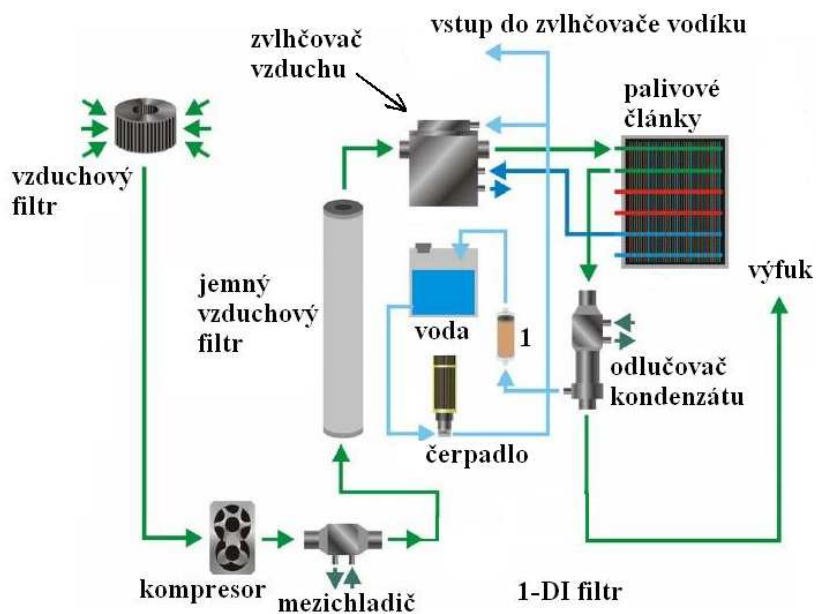
3.2 Volba jednotlivých agregátů

Agregáty pohonu se dají rozdělit do čtyř podsystémů:

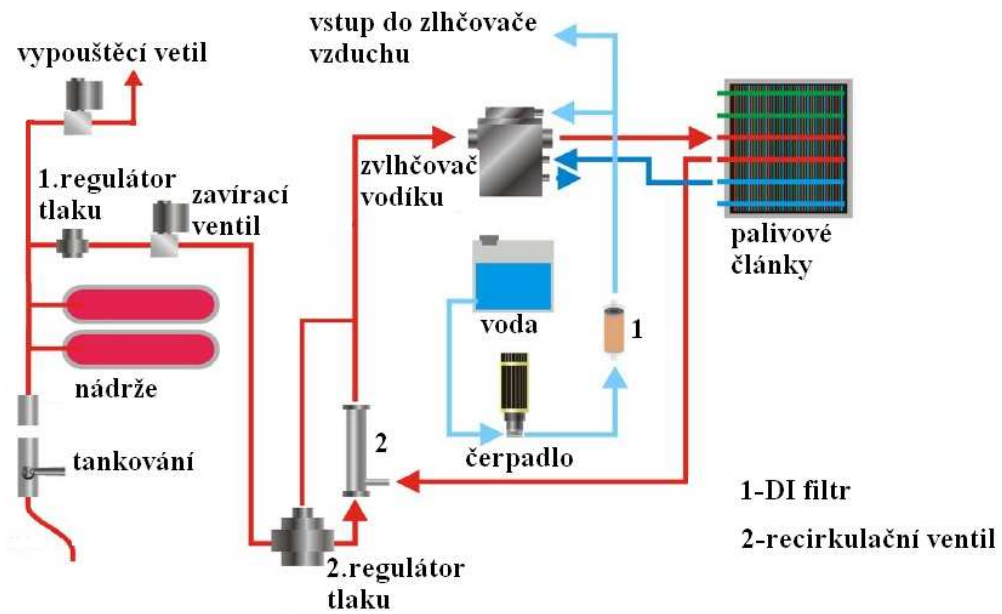
- | | |
|---------------------------------|-----------------------------------|
| 1-Elektrický podsystém | - obrázek 3.2 - A (fialová barva) |
| 2-Vzduchový podsystém | - obrázek 3.2 - B |
| 3-Palivový (vodíkový) podsystém | - obrázek 3.2 - C |
| 4-Chladicí podsystém | - obrázek 3.2 - D |



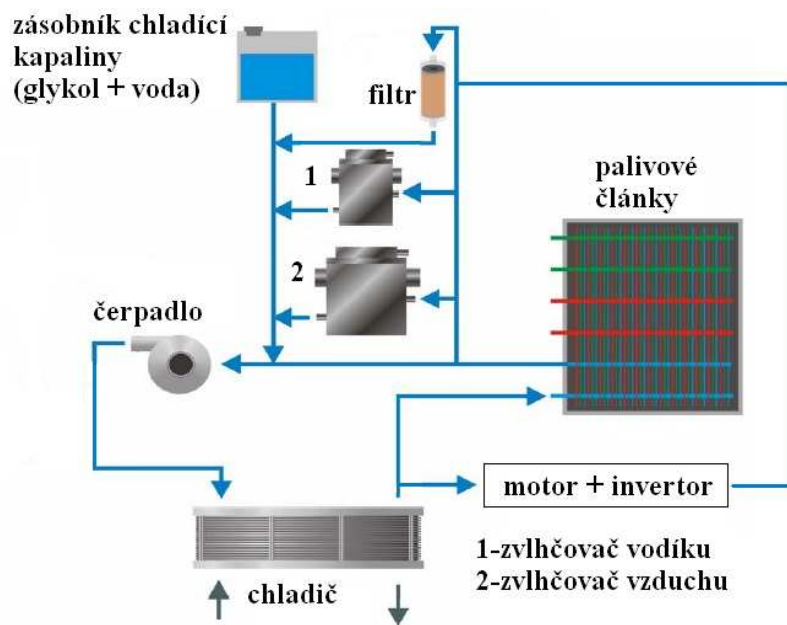
Obrázek 3.1



Obrázek 3.2



Obrázek 3.3



Obrázek 3.4

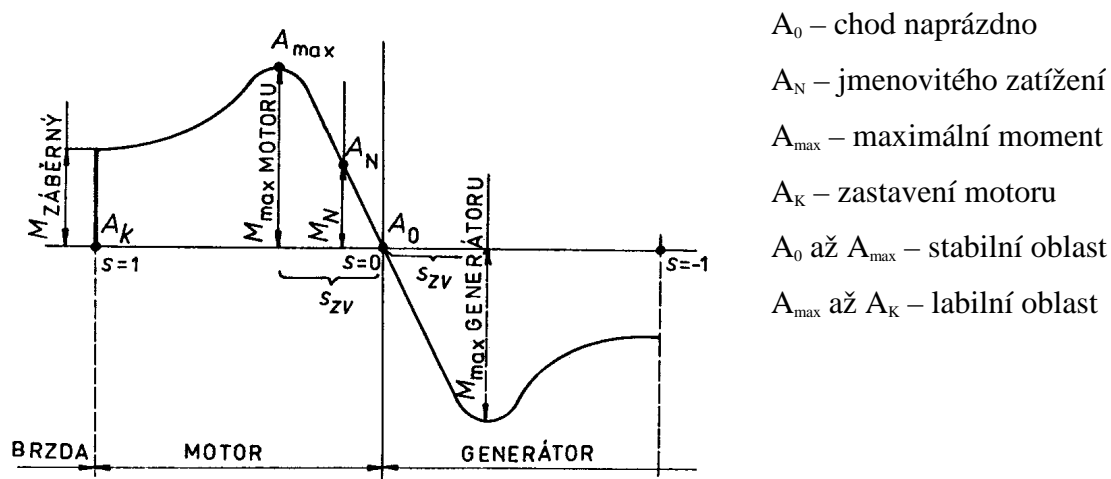
Hlavní prvky pohonu:

- Elektromotor
- Palivové články
- Invertor
- Akumulační prvek
- Palivové nádrže

3.2.1 Asynchronní motor

Asynchronní motor je vhodným motorem pro použití ve vozidle hlavně díky své konstrukční jednoduchosti, která zajišťuje jeho dobrou provozní spolehlivost a nízkou cenu. Mezi další výhody patří jeho trakční charakteristika, která mu teoreticky umožňuje pracovat ve velkém rozsahu otáček (cca 2500 až 13000 rpm) s maximálním výkonem. Další výhodou je možnost použití asynchronního motoru v generátorickém režimu. Mezi jeho největší nevýhody dlouhou dobu patřilo obtížné řízení, které ho téměř vylučovalo z použití v servopohonech. Tento problém je v dnešní době vyřešen použitím nových výkonových prvků, které umožňují vektorové řízení.

Momentová charakteristika asynchronního motoru:



Obrázek 3.5

Vztah pro moment asynchronního motoru popisuje Klossova rovnice(1)

$$M = M_{max} \frac{2}{\frac{s_{zv}}{s} + \frac{s}{s_{zv}}} \quad (1)$$

s_{zv} - skluz zvratu

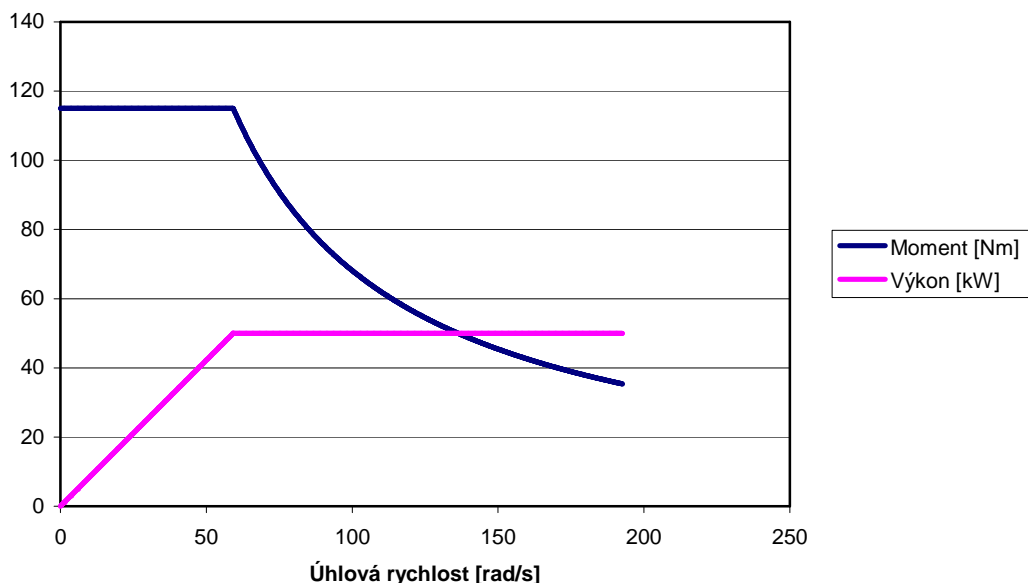
s - skluz

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2)$$

n_s - synchronní otáčky

n - skutečné otáčky

Trakční charakteristika asynchronního motoru:



Obrázek 3.6

Trakční charakteristika je obálkou momentových charakteristik u kterých se mění synchronní otáčky. Tím pádem je závislá pouze na výstupních otáčkách.

Výběr motoru:

Technická data vozu Octavia Combi 1.4 MPI 55 kW:

- Nejvyšší rychlost : 169 km/h
- Nejvyšší výkon motoru : 55 kW
- Největší točivý moment motoru: 126 Nm
- Největší stoupavost: $19.2^\circ = 35\%$

Na základě těchto parametrů jsem vybral motor od firmy Ballard **A 300V100 MS**. Tento motor firma Ballard přímo doporučuje k použití ve vozidlech. Vyznačuje se velkou spolehlivostí a dlouhou životností. Nižší stálý výkon vybraného motoru je kompenzován jeho dobrou trakční charakteristikou a možností krátkodobého přetížení až o 100 %. Dále je motor vybaven mechanismem, který zabrání nechtěnému protáčení při parkování.

Ballard nabízí na výběr ze tří velikostí stálého převodu, který je součástí motoru (9,3 9,96 a 10,66)

Díky invertoru, který může změnit řízením proudů ve statorovém vinutí smysl otáčení magnetického pole ve vzduchové mezeře, se může rotor elektromotoru otáčet stejnou rychlostí při couvání jako při jízdě vpřed. Proto z důvodu bezpečnosti musejí být otáčky při couvání elektronicky omezeny.

Některé technické parametry:

- Špičkový výkon	100 kW
- Maximální výkon bez přetížení	50 kW
- Maximální otáčky se zatížením	13500 rpm
- Maximální otáčky bez zatížení	15000 rpm
- Maximální účinnost	92 %
- Rozměry (délka x výška x šířka)	607 x 400 x 342 mm
- Hmotnost včetně stálého převodu	108 kg



Obrázek 3.7 – vybraný asynchronní motor A 300V100 MS

(zdroj: http://www.ballard.com/be_a_customer/electric_drives_and_systems 23.2.2006)

Podrobnější informace o tomto motoru viz příloha 2.

3.2.2 Palivové články na vodík

Historie

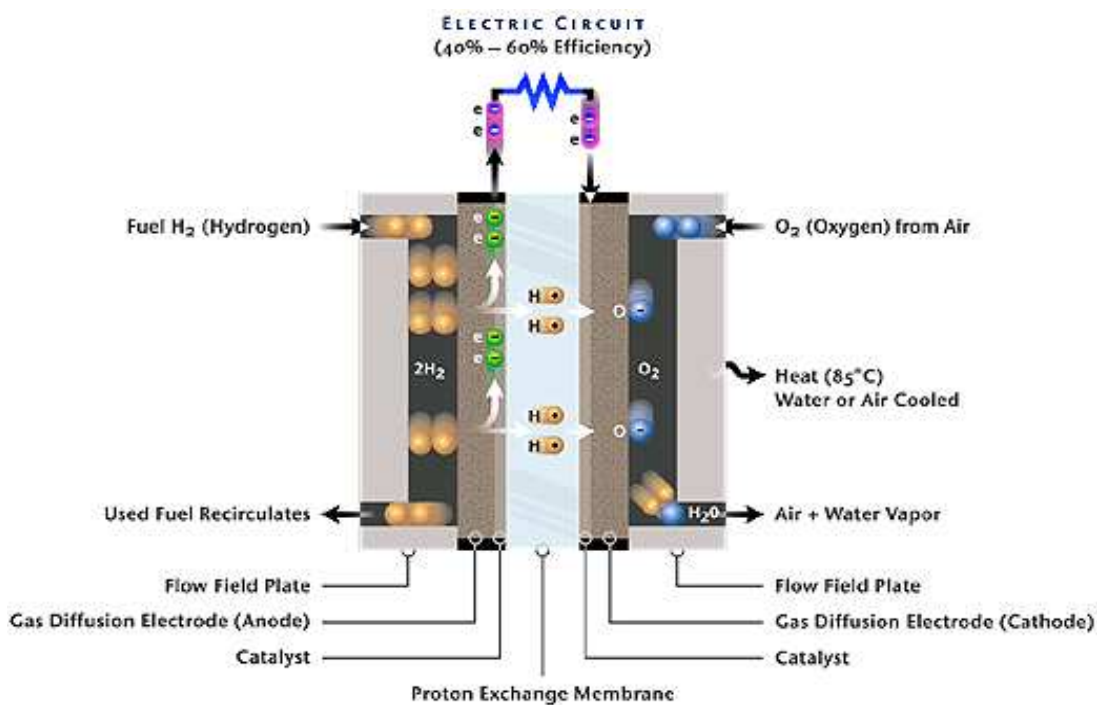
Objevitelem principu palivových článků je Sir William Grove, datum objevu bylo stanoveno na rok 1839. Dlouhou dobu nebyla motivace vyvíjet poměrně drahou a dobře nahraditelnou technologii. Významný rozvoj palivových článků byl způsoben až zájmem společnosti NASA, která hledala alternativní zdroje pro vesmírné lety Gemini a Apollo. Díky energetické krizi v roce 1973 a velkému zájmu NASA jsou dnes palivové

články na úrovni, kdy je lze úspěšně použít v různých aplikacích. Z již zmíněného v kapitole 2.1.1 se pro použití v automobilech hodí nejvíce články typu PEM. Proto se dále budu zabývat pouze jimi.

Princip PEM FC

Palivové články přeměňují chemickou energii vodíku na stejnosměrný elektrický proud. Skládají se z velkého počtu elektrodových sestav (MEA).

Jedna sestava (článek) se skládá ze dvou elektrod (anoda a katoda) potažených tenkou katalyzátorovou vrstvou, které jsou odděleny iontoměničnou membránou (PEM). Tato membrána je elektrickým dielektrikem (nepropouští elektrony e^-) a přitom je iontově vodivá (protony H^+ mohou projít). Vodík je přiváděn k anodě, na které za přítomnosti katalyzátorové vrstvy štěpí na protony a elektrony. Protony projdou iontoměničnou membránou a elektrony prochází elektrickým obvodem, kde vytvářejí elektrický proud. Ke katodě je přiváděn kyslík, který zde katalyticky reaguje s prostoupěnými protony a elektrony za vzniku vody. Na obou elektrodách vzniká rozdíl potenciálů kolem 1,2 voltu, který při zatížení článku poklesne. Není-li k článku připojena zátěž, nemohou elektrony projít vnějším obvodem a reakce se zastaví, čímž se nespotřebává palivo.



Obrázek 3.8 - schéma palivového článku typu PEM

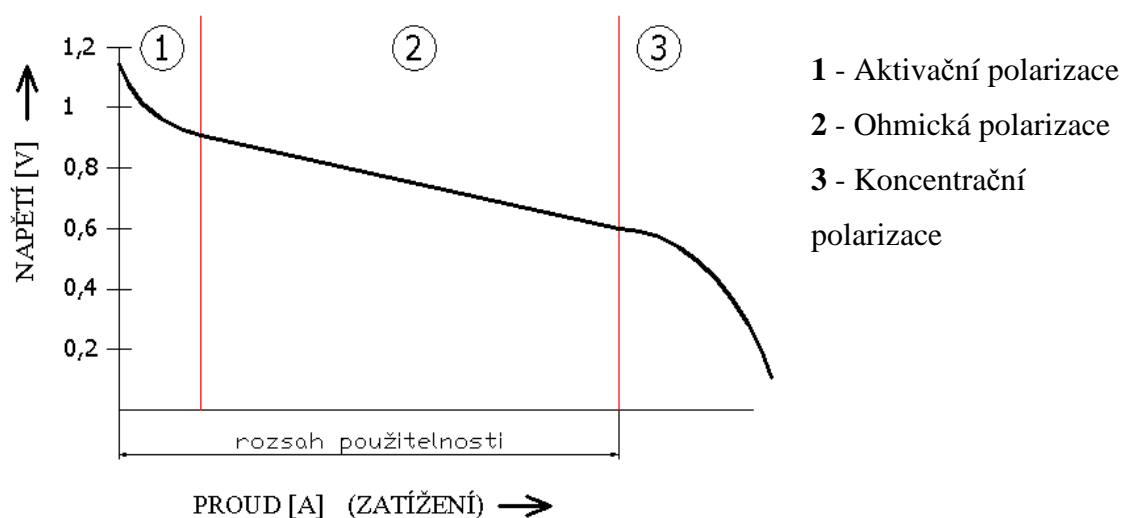
(zdroj: http://www.ballard.com/be_informed/fuel_cell_technology/ 17.2.2006)

Účinnost PEM FC

Jednou z největších výhod palivových článků je jejich účinnost. Nesmí se však opomenout fakt, že účinnost celého systému není rovna účinnosti pouze elektrochemické reakce, ale musí být zohledněna i účinnost získávání paliva a přeměna elektrické energie na energii mechanickou. "Zjednodušeně se dá účinnost palivového článku vyjádřit jako podíl skutečně vyrobeného a teoreticky dosažitelného napětí článku."¹ Každý palivový článek může vyrobit maximální teoretické napětí 1,187 V (25 °C / 77 °F; 1 atm).

$$\eta_{teor} = \frac{u_{skut}}{u_{teor}} = \frac{u_{skut}}{1,187V} \quad (3)$$

Skutečné napětí závisí na proudu procházejícím článkem a při jeho nárůstu klesá. Nejvyšší účinnost má tedy článek ve stavu naprázdno. Tento jev se nazývá polarizace článku a je znázorněn polarizační křivkou na obrázku 3.2.2. B



Obrázek 3.9 - Polarizační křivka palivových článků typu PEM

Volba PEM FC

Při výběru palivových článků jsem vycházel z výkonových parametrů použitého elektromotoru tak, aby byla pokryta převážná část jeho maximálního výkonu. Zbytek příkonu může být krátkodobě pokryt ze superkondenzátorů. V tomto případě nemůže dojít k přetížení z důvodu krátké doby vybíjení kondenzátorů. Palivové články zvolím

¹ Zdroj: <http://hydrogenix.vsb.cz/teorie.html> 5.02.2005 (zpráva Vysoké školy báňské)

tak aby většinu provozní doby pracovali na přibližně třetinovém jmenovitém výkonu, což bude mít velkou výhodu v poměrně vysoké účinnosti.

Jednou z nejvýznamnějších firem vyrábějících palivové články je Ballard. Od této firmy jsem vybral články s označením **MARK 902**. Tyto palivové články čtvrté generace Ballard doporučuje pro užití v lehkých vozidlových aplikacích. Jejich výhodou je vysoká spolehlivost, velká výkonová hustota ($1,13 \text{ kW/dm}^3$) a nižší cena daná sériovou výrobou. Navíc je výhodou možnost pracovat při teplotách pod 0°C . To je dáno použitým chladičem (50% glykol, 50% voda). Avšak s pracovní teplotou výrazně pod bodem mrazu mají obecně palivové články potíže.



Technické parametry:

- Maximální výkon 85 kW
- Proud 300 A
- Napětí při P_{\max} 284 V
- Okysličovadlo: vzduch (1-2 bar)
- Rozměry (d x š x v) 805x 375x 250 mm

Obrázek 3.10 – Palivové články MARK 902

(zdroj: http://www.ballard.com/be_a_customer/fuel_cells 11.1.2006)

Podrobnější informace o tomto palivovém článku viz příloha 3.

3.2.3 Invertor

Invertor je výkonový řídicí elektrotechnický prvek, který slouží k hladkému řízení motoru. Vybral jsem invertor od firmy Ballard, který je přímo určen k použitému motoru. Mezi jeho další funkce patří ochrana motoru před proudovým přetížením a aktivní kontrola jeho chvění při vysokých otáčkách. Dále tento invertor nabízí volbu brzdných (rekuperačních) součinitlů.



Technické parametry:

- Typ řízení: vektorové
- Nejvyšší přepínací napětí 600V
- Typ tranzistorů IGBT
- Vstupní napětí až 395V DC
- Výstup: 3 fáze AC, 0-100 kW, 0-500 Hz
- Maximální účinnost 97%
- Hmotnost** 22 kg
- Rozměry (d x š x v) 380x 330x 190 mm

Obrázek 3.11 – Invertor A 300V100 IN

(zdroj: http://www.ballard.com/be_a_customer/electric_drives_and_systems 12.1.2006)

Podrobnější informace o tomto invertoru viz příloha 4.

3.2.4 Akumulační prvek

Do vozidel s palivovými články je velice výhodné umístit rekuperační obvod, protože všechny ostatní agregáty (elektromotor, usměrňovač, DC/DC měnič...) už jsou součástí pohonu, takže se nemusí na rozdíl od pohonu se spalovacím motorem instalovat do automobilu další příslušenství, které by bylo potřeba k rozšíření pohonu o rekuperační funkci.

Rekuperační systém ve vozidle slouží k uchování energie, která by byla u konvenčních automobilů zmařena v brzdách. Tato energie se dá později využít k rozjezdu či urychlení vozidla. Rekuperace energie se nejvíce projeví v městském režimu jízdy, kdy vozidlo často mění svoji rychlost.

V případě mnou navrženého pohonu může být naakumulovaná energie použita k částečnému doplnění zbývajících příkonu elektromotoru, který má maximální příkon 108kW a palivové články ho mohou napájet pouze 85kW. Tento rozdíl může být snížen relativně krátkou dobu. Spolupráce všech agregátů bude vyžadovat vyspělou řídicí jednotku. Tato řídicí jednotka by v budoucnu mohla dávat řidiči možnost volit mezi sportovním a ekonomickým režimem jízdy, kdy při prvním z nich by se řídicí jednotka snažila udržovat akumulací člen nabitý pro použití k náhlé akceleraci vozu s příkonem motoru nad 85kW. V ekonomickém režimu by se jednotka snažila akumulací prvek při první příležitosti vybit, aby byl připraven akumulovat co nejvíce energie při brždění.

Výběr prvku:

Tabulka 3.2

Posuzované vlastnosti	Váhový součinitel	Baterie	Body	Superkondenzátor	Body
Doba nabíjení	0,2	0,5 – 5 h	30	0,3 – 30 s	80
Doba vybíjení	0,1	0,25 – 3 h	30	0,3 – 30 s	80
Měrná energie [Wh/kg]	0,25	10 – 100	90	1 - 10	25
Měrný výkon [W/kg]	0,1	< 1000	40	< 10 000	90
Účinnost nabíjení a vybíjení	0,15	70 – 85 %	75	85 – 98 %	95
Životnost [cyklů]	0,15	< 5000	25	> 500 000	85
Pracovní podmínky	0,05	-10 až 80 °C	60	-40 až 80 °C	80
Součet	1		53,5		70,25

Baterie jsou vhodné především u hybridních pohonů s PSM, protože u nich není vyžadována taková rychlost nabíjení, tj. mohou se nabíjet pomaleji v době, kdy vozidlo využívá k provozu malý výkon, ale PSM pracuje při vyšším zatížení, při kterém má vyšší účinnost. Takovýto režim je u pohonu s palivovými články vyloučen, protože při malém výkonu elektromotoru pracují články s vyšší účinností (viz kap. 3.2.2). Nabíjení tedy může probíhat pouze v době brždění. Proto musí být velice rychlé. Váhový koeficient u vybíjení jsem zvolil nižší, protože elektromotor pracuje výrazně delší dobu v motorickém, než v generátorickém režimu. Doba vybíjení tedy omezuje rekuperační

funkci pouze v tom případě, kdy se rychle po sobě střídá akcelerace s bržděním a akumulací člen se není schopen plně vybít a tak pojmout co nejvíce energie při brždění. Na základě tab. 2 jsem zvolil jako hlavní akumulací prvek superkondenzátor, který bude doplněn klasickou olověnou baterií pouze pro napájení malých spotřebičů ve vozidle v případě vyčerpání paliva.

Superkondenzátor – teorie

Kondenzátor je z principu nejvýhodnější součástka k uchovávání elektrické energie, protože jako jediný uchovává energii přímo v elektrické formě. To má za následek tři velké výhody. Jednou z nich je vysoká účinnost nabíjení a vybíjení, druhou je vysoký počet pracovních cyklů a třetí je vysoký měrný výkon, kterému baterie založené na principu přeměny elektrické energie na chemickou a zpět nemohou konkurovat. Nejvýznamnější nevýhodou byla dlouhou dobu nízká měrná energie, která se pohybuje u klasických kondenzátorů v řádech setin Wh/kg. Měrná energie superkondenzátoru (příp. ultrakondenzátoru) je ovšem až 100 x vyšší.

Princip uchovávání energie v superkondenzátoru byl popsán již v roce 1856 K.Hemholtzem. Po přiložení napětí na elektrody ponořené v elektrolytu se vytvoří elektrochemická dvouvrstva. Někdy je proto ultrakondenzátor nazýván elektrochemickým dvouvrstvým kondenzátorem. Energie je stejně jako u klasického kondenzátoru uchovávána v elektrostatickém poli. U moderních kondenzátorů je elektrolytem vysoce vodivé organické rozpouštědlo, které umožňuje rozdíl potenciálů mezi elektrodami až 3 V.

Elektrody se u superkondenzátorů nejčastěji vyrábějí z aktivovaného uhlíku. Výhodami tohoto materiálu jsou chemická netečnost, ekologická odbouratelnost, dobrá elektrická vodivost, relativně nízká cena a hlavně velká dosažitelná plocha skutečného povrchu. Povrch elektrod může být až 2000 m²/g, při tloušťce dvouvrstvy do 10 nm. Díky těmto vlastnostem aktivovaného uhlíku mají ultrakondenzátory kapacitu řádově tisíců Faradů ve velmi malém objemu.

Energie jenž je uložena v kondenzátoru se dá vyjádřit vztahem:

$$E = \frac{1}{2} \times C \times U^2 \quad [J, F, V] \quad (4)$$

Energie uskladněná v kondenzátoru je tedy přímo měřitelná pomocí napětí. Napětí kondenzátoru je závislé na velikosti náboje Q uloženého v elektrostatickém poli a kapacitě C . Pro přírůstek napětí platí při konstantním nabíjecím proudu vztah:

$$\Delta U = \frac{\Delta Q}{C} = \frac{I \cdot t}{C} \quad [C, F, V, A, s] \quad (5)$$

Volba superkondenzátoru

Při výběru superkondenzátoru je důležité uvědomit si jak velkou energii je potřeba uchovat. V případě mého pohonu budu vycházet pouze z kinetické energie vozidla, protože při dimenzování kondenzátoru na pojmutí energie při dlouhém klesání bych došel k tak velké hmotnosti, ceně a rozměrům, že by se těžko náklady vrátily na ušetřeném palivu. Maximální rychlost, ze které vozidlo zastaví pomocí elektromotoru tak aby nebyla překročena kapacita superkondenzátoru, volím 70 km/h. Energie získaná při zastavení z této rychlosti pokryje většinu případů zastavování vozidla v obci a některé případy zpomalování z vyšších rychlostí. Při výpočtu kinetické energie nebudu uvažovat ztráty valivým odporem ani odporem vzduchu, které není možné přeměnit na elektrickou energii. Skutečná rychlost, ze které by při zastavování nemuselo dojít k brždění kotoučovými brzdami by tedy byla vyšší. Dále budu uvažovat brždění na rovině. Potom teoreticky využitelná kinetická energie bude:

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \left(\frac{v_{[\text{km/h}]}}{3,6} \right)^2 \quad m = 1500 \text{ kg} \quad (6)$$

$$E_{\text{kin}} = 283 \text{ kJ}$$

Superkondenzátorovou baterii jsem vybral od firmy **Epcos** s označením **UltraCap 450F/14V**.



Technické parametry:

- Nominální kapacita	450 F
- Nominální napětí	13,8 V
- Maximální proud	400 A
- Maximální vnitřní odpor	4,1 mΩ
- Měrná energie	2.65 Wh/kg
- Měrný výkon	2580 W/kg
- Max. uložená energie	42849 J
- Životnost	90 000 h (5*10 ⁵ cyklů)
- Provozní teploty	-40 až +70°C
- Hmotnost	4,5 kg
- Rozměry (V x Š x D)	173 x 123 x 184 mm

Obrázek 3.12 – UltraCap 450F/14V

Podrobnější informace o této kondenzátorové baterii viz příloha 5.

Sériovým zapojením šesti vybraných kondenzátorových baterií získám celkový akumulací prvek.

Výsledné parametry kondenzátorové baterie:

- Celková kapacita:

$$\frac{1}{C_{celk}} = \sum_{n=1}^6 \frac{1}{n_i} \quad C_{celk} = 75F \quad (7)$$

- Nominální napětí:

$$U_{nom} = \sum_{n=1}^6 n_i = 82,8V \quad (8)$$

- Maximální vnitřní odpor:

$$R_{celk} = \sum_{n=1}^6 R_i = 24,6m\Omega \quad (9)$$

- Celková uložená energie 257,1 kJ

- Hmotnost (bez obalu) 27 kg

- Rozměry (V x Š x D) 173 x 184 x 738 mm

Hodnoty maximálního proudu, měrné energie, měrného výkonu, životnosti a provozních teplot zůstávají stejné jako u šesti-kondenzátorové baterie.

Příklad rekuperace energie při brždění z delšího klesání:

Volím:

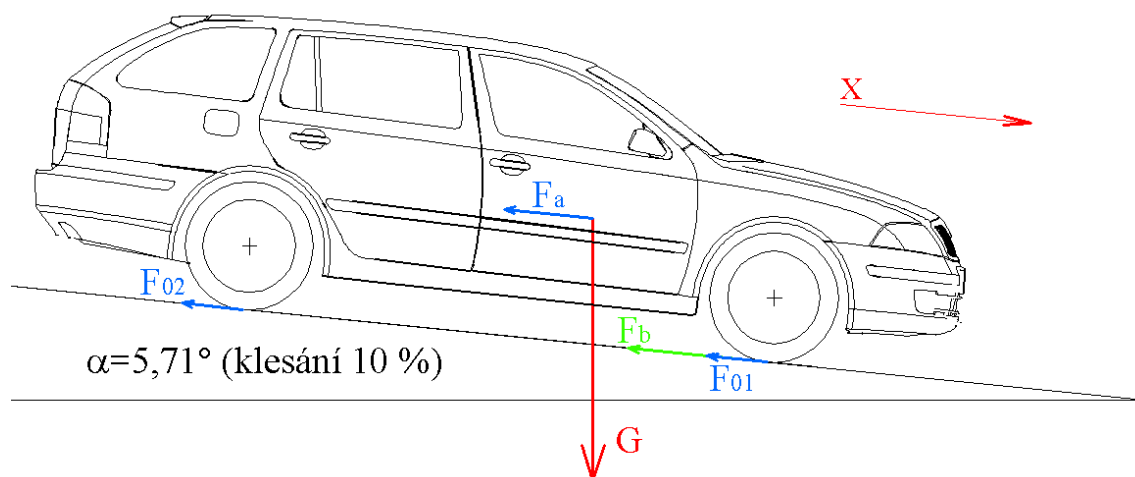
- klesání 10%;
- konstantní rychlost 80 km/h;
- hmotnost 1500 kg;
- Souččin $K = S_x \cdot c_x \cdot \rho = 0,8028$ viz kapitola 4.2;
- součinitel odporu valení $f = 0,02$ viz kapitola 4.2;
- účinnost motoru a převodovky $\eta_{mp} = 0,78$;
- gravitační zrychlení $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

Počáteční podmínky:

- počáteční rychlost $v_0 = 80 \text{ km/h}$
- počáteční stav kondenzátoru $E_0 = 0 \text{ J}$ (vybito)

Určuji:

- dráhu s , po kterou můžu brzdit pouze motorem a nabíjet tak kondenzátor do stavu úplného nabití ($E_k = 257,1 \text{ kJ}$).



Obrázek 3.13

Výpočet:

$$F_0 = F_{01} + F_{02} = f \cdot G \cdot \cos(\alpha) = 292,84N \quad (\text{celkový valivý odpor}) \quad (10)$$

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot v^2 \cdot K = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{80}{3,6} \right)^2 \cdot K = 198,22N \quad (\text{aerodynamická síla}) \quad (11)$$

$$F_b = G \cdot \sin(\alpha) - F_0 - F_a = 973,14N \quad (\text{rovnice rovnováhy ve směru x}) \quad (12)$$

$$E_b = s \cdot F_b = \frac{E_k}{\eta_{mp}} = \frac{257100}{0,78} \Rightarrow s = \frac{329615,4}{973,14} = 338,7m \quad - \text{výsledná dráha} \quad (13)$$

Závěr:

I při poměrně prudkém klesání je rekuperační systém schopen uložit potenciální energii na poměrně dlouhé dráze. Prudších a delších kopců není v ČR příliš, proto by baterie vlivem svojí hmotnosti výslednou spotřebu možná i zhoršila. Z tohoto důvodu nebudu kombinovat superkondenzátor s baterií, která by ve výsledku automobil pouze prodražila.

3.2.5 Palivové nádrže

Vodíkové nádrže, při zanedbání jejich hmotnosti, ovlivní pouze jeden parametr vozidla a tím je dojezd. Obvykle se dojezd automobilů s palivovými články pohybuje okolo 400 km. Tato nízká hodnota je dána především faktem, že vodík je nejlehčí chemický prvek. A i přes svojí velkou měrnou energii má díky své nízké hustotě i ve zkapalněném stavu nízkou energetickou hustotu.

Porovnání vodíku s benzínem:

Tabulka 3.3

	Benzín	Zkapalněný vodík	Stlačený vodík (70Mpa,15°C)
Měrná energie [MJ/kg]	44,5	119,93	141,86
Hustota [kg/dm ³]	0.72	0.0708	0,0329
Energetická hustota [MJ/dm ³]	32,04	8,491	4,667

Z tabulky 3.3 je vidět, že stlačený vodík má téměř sedmkrát nižší energetickou hustotu než benzín.

Volba nádrží na vodík

Při výběru druhu nádrží jsem se rozhodl pro tlakové nádrže z kompozitních materiálů, které nabízejí dobrou kombinaci bezpečnosti, energetické hustoty, ceny a doby skladování. Mezi hlavní výrobce těchto nádrží patří firmy Quantum a Dynetek. Po prostudování technických parametrů jsem zvolil palivový systém od firmy Dynetek.



Konstrukce:

Hliníková vrstva, která zajišťuje téměř nulovou propustnost vodíku, je obalena kompozitním materiálem z uhlíkových vláken, který zajišťuje velkou pevnost nádrže. Takto konstruovaná nádrž vyhovuje přísným bezpečnostním testům.

Obrázek 3.14 – Řez nádrží na vodík

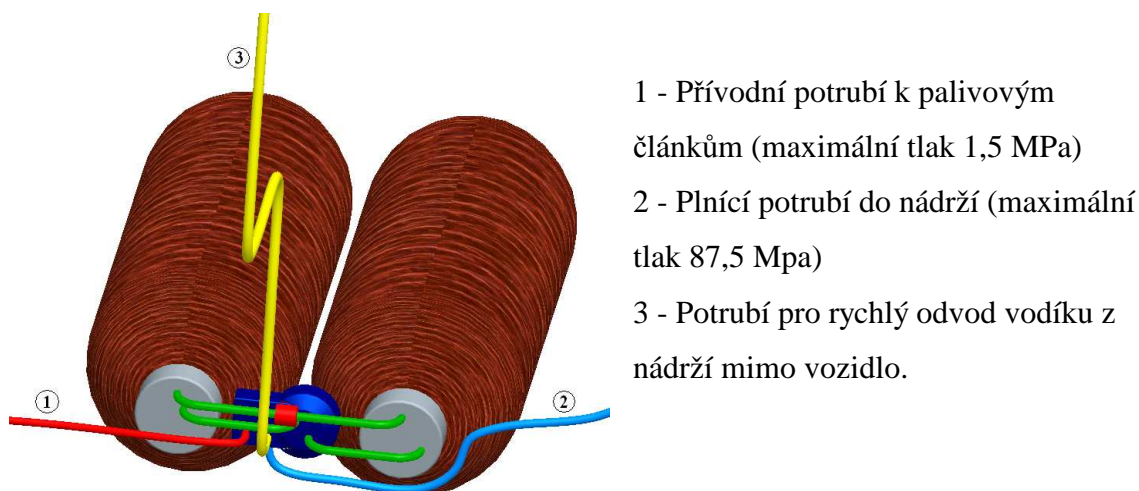
Technické parametry zvoleného palivového systému:

Průměr nádrží:	302 mm
Maximální délka:	906 mm
Obsah vodíku:	2,88 kg při 700 barech (72 l vnitřní objem)
Celková hmotnost:	87,8 kg
Maximální provozní tlak:	700 barů při 15°C
Maximální plnicí tlak:	875 barů při 85°C
Tlak na výstupu z nádrží:	10,5 ± 1 bar
Hmotnostní tok na výstupu:	0 - 2 g/s (0 - 7,5kg/h)
Minimální provozní teplota:	-40°C
Maximální provozní teplota:	+85°C

Nevýhodou těchto nádrží je ve srovnání s konvenční palivovou nádrží dlouhá doba tankování. Výrobce udává tuto dobu do 2 min. Ve skutečnosti se ovšem jedná o dobu kolem 4 minut. Tato doba je dána přehříváním vodíku při rychlém stlačení. Plnicí

zařízení dopočítává podle průběhu plnění předpokládanou teplotu vodíku. Plnění musí být na chvíli zastaveno při dosažení teploty 85°C.

Při vyprazdňování nesmí dojít k poklesu tlaku v nádržích pod 5 barů. V případě prudkého vzrůstu tlaku vodíku nad bezpečnou hranici, nebo vzrůstu teploty vodíku nad 85°C je vodík rychle odpuštěn mimo vozidlo pojistným potrubím. Toto potrubí ústí u horní části rámu pátých dveří.



Obrázek 3.15

3.3 Návrh převodového ústrojí

Zvolený elektromotor má tak dobrou trakční charakteristiku, že by pro použití ve vozidlech s nižší hmotností potřeboval pouze stálý převod k tomu, aby zajistil takové provozní parametry vozidla, které jsou konkurenceschopné parametrům konvenčních automobilů. V případě mého návrhu pohonu ale použiji ve spolupráci s motorem dvoustupňovou převodovku, protože vylepší parametry vozidla hned v několika směrech.

Při jízdě menší rychlostí se zlepší stoupavost vozu, aniž by musel být stálý převod tak velký, aby snížil maximální rychlost vozidla. Dále zvýší podíl rekuperačního brždění a do určité rychlosti může motor pracovat v generátorickém režimu tak, že kola jsou na mezi adheze a tudíž se nemusí mařit energie v brzdách ani při tom nejprudším brždění. Při vyšších rychlostech zase díky nižší hodnotě stálého převodu nemusí motor pracovat ve svých maximálních otáčkách, kdy dochází k poklesu účinnosti vlivem vyšších vířivých ztrát v rotoru. Další nespornou výhodou převodovky je možnost řazení

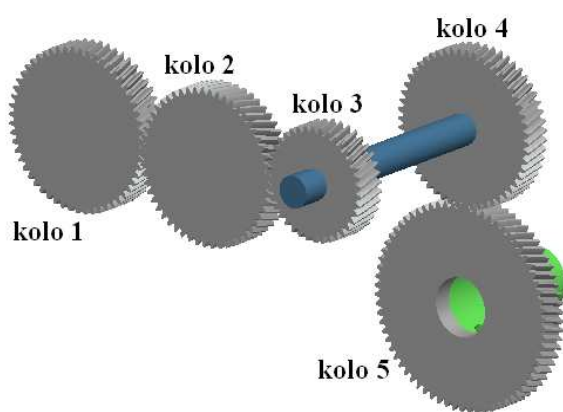
pod zatížením. Řazení je uskutečněno pomocí dvou lamelových spojek spojujících skříní s centrálním kolem a unášec s centrálním kolem. Každá planetová převodovka je řaditelná zvlášť, což umožňuje zvýšení momentu na kole při výrazně horších adhezních podmínkách na druhém kole (např. na okraji vozovky je led) bez uzávěrky diferenciálu.

3.3.1 Návrh stálého převodu:

Při návrhu stálého převodu budu vycházet z maximální rychlosti (kapitola 4.2). Na základě hodnot dosažitelných maximální rychlosti volím rychlost 180 km/h. Tuto hodnotu volím záměrně vyšší než rychlost kterou může jet vozidlo bez momentového přetížení motoru. Důvodem je vyšší účinnost motoru při nižších otáčkách daná menšími ventilačními ztrátami. Při této rychlosti se motor bude otáčet nominálními otáčkami (13500 rpm).

Navržený stálý převod:

$$i_{stál_návrh} = \frac{n_{mot}[rpm] \cdot 2 \cdot \pi \cdot r_d \cdot 60}{1000 \cdot v[km/h]} = \frac{13500 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 0.3 \cdot 60}{1000 \cdot 180} = 8,482 \quad (14)$$



Zvolené počty zubů:

$$z_1 = 55, z_2 = 53, z_3 = 38, z_4 = 53, z_5 = 70$$

Zvolený stálý převod motoru z uvedených v kapitole 3.2.1 :

$$i_{mot} = 9,3$$

Celkový stálý převod:

$$i_{stál} = \frac{z_3 \cdot z_5 \cdot i_{mot}}{z_1 \cdot z_4} = \frac{38 \cdot 70 \cdot 9,3}{55 \cdot 53} = 8,486 \quad (15)$$

Obrázek 3.16 – Stálý převod

3.3.2 Konstrukce převodovky

Převodovka se skládá ze stálého převodu, diferenciálu a dvou planetových převodovek. Skica znázorňující uspořádání viz příloha KSD-DP-508-01.

1.převodový stupeň:

Moment se přivádí na korunové kolo. Při zastaveném pastorku se moment odebírá z

unášeče. Převodový poměr potom je: $i_{plan_I} = i_{k \rightarrow u}^p = 1 + \frac{z_c}{|z_k|} = 1 + \frac{31}{65} = 1,477$ (16)

Celkový převodový poměr na 1.stupeň: $i_{celk_I} = i_{stál} \cdot i_{plan_I} = 12,533$ (17)

2. převodový stupeň:

Moment se přivádí na korunové kolo. Pastorek je spojen s unášečem. Planetová převodovka se potom otáčí jako jeden celek. Převodový poměr tedy je: $i_{plan_II} = 1$

Celkový převodový poměr na 2.stupeň: $i_{celk_II} = i_{stál} \cdot i_{plan_II} = 8,486$ (18)

Podmínka souososti:

$$z_k = z_c + 2 \cdot z_s \quad (19)$$

$$65 = 31 + 2 \cdot 17 \Rightarrow \text{vyhovuje}$$

Podmínka montáže:

$$\frac{z_k + z_p}{n} = \text{celé číslo} \Rightarrow \text{vyhovuje pro } n = 2, 3, 4 \text{ nebo } 6 \quad (20)$$

Vzhledem k poměru zubů korunového kola a pastorku volím šest satelitů.

i_{plan_I}	- převodový poměr planetové převodovky na první stupeň;
i_{plan_II}	- převodový poměr planetové převodovky na druhý stupeň;
$i_{stál}$	- převodový poměr stálého převodu;
$z_k = 65$	- počet zubů korunového kola;
$z_p = 31$	- počet zubů pastorku;
$z_s = 17$	- počet zubů satelitu;
$n = 6$	- zvolený počet satelitů.

3.3.3 Vlastnosti převodovky

Díky dvěma planetovým převodovkám na výstupech z diferenciálu nabízí převodovka další funkci, a tou je možnost rozdělit moment na kolech v poměrech M_p : $M_L = 1,477:1$ a M_p : $M_L = 1:1,477$. Tato funkce může v situaci, kdy jsou rozdílné adhezní podmínky na pravém a levém kole zvýšit celkovou hnací sílu ($F_{KL} + F_{KP}$).

Příklad:

Automobil se rozjíždí do kopce a pod jeho pravým předním kolem je vrstva sněhu (součinitel adheze například 0,15). Jeho levé přední kolo je ale na suché vozovce (součinitel adheze například 0,7). Při uvážení stejné normálové síly na kola vlivem tíhy vozidla (například 4000 N na každé kolo), by automobil s klasickou převodovkou bez uzávěrky diferenciálu mohl mít maximální hnací sílu na pravém kole $F_{KP} = 600$ N. Při zanedbání tření v diferenciálu by potom hnací síla na levém kole mohla být také nejvýše 600 N. Celková hnací síla by tedy byla maximálně 1200 N. Stejně vozidlo by za stejných podmínek s mnou navrženou převodovkou mělo stejnou maximální hnací sílu na pravém kole (stejný maximální moment). Řídící jednotka by ale měla možnost při protáčeším se pravém kole zařadit na pravé planetové převodovce druhý převodový stupeň ($i_{plan_p}=1$ "direkt" spojení pastorku s unáščem) a na levém kole ponechat první převodový stupeň ($i_{plan_L}=1,477$ spojení pastorku se skříní převodovky). Potom může být součet hnacích sil na kolech 1486,2 N ($F_{KP} = 600$ N, $F_{KL} = 886,2$ N). To je o téměř 24% větší síla než s klasickou převodovkou.

Další drobnou výhodou takto navržené převodovky je, že napříč uložený motor s poměrně velkým momentem setrvačnosti má opačný smysl otáčení než kola. To vede ke stabilizačnímu gyroskopickému momentu působícímu na vozidlo.

Pro gyroskopický moment platí zjednodušený vztah:

$$M_{gyr} = I_{mot} \cdot \vec{\omega}_M \times \vec{\omega}_u \quad (21)$$

M_{gyr} – Gyroskopický moment;

I_{mot} – moment setrvačnosti motoru (výpočtem odhaduji $I_{mot}=0,386 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$);

ω_M – úhlová rychlost motoru;

ω_u – unášivá úhlová rychlost.

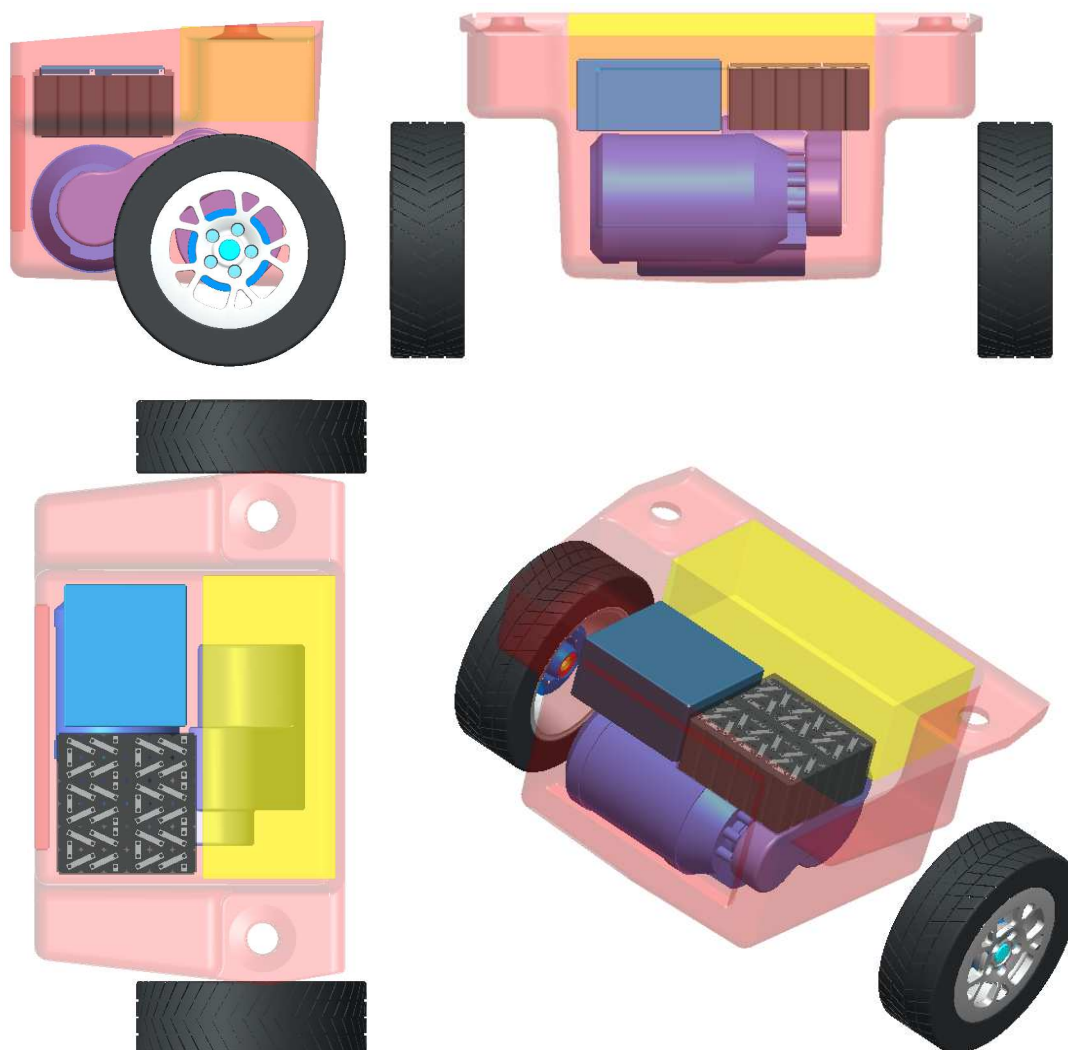
Například na vozidlo jedoucí rychlostí 70 km/h zatáčkou o poloměru 60m působí při zařazeném prvním rychlostním stupni gyroskopický moment 87 Nm. Tento moment není moc velký, proto sníží klopný moment způsobený odstředivou silou a polohou těžiště opravdu nepatrně.

3.4 Zástavba agregátů

Zástavbu agregátů jsem navrhl pomocí programu Pro ENGINEER. Nejdříve jsem si ve škole změřil motorový a zavazadlový prostor vozu Octavia Combi. Poté jsem si tyto prostory vymodeloval a následně se do nich pokusil bez kolize vložit vymodelované agregáty.

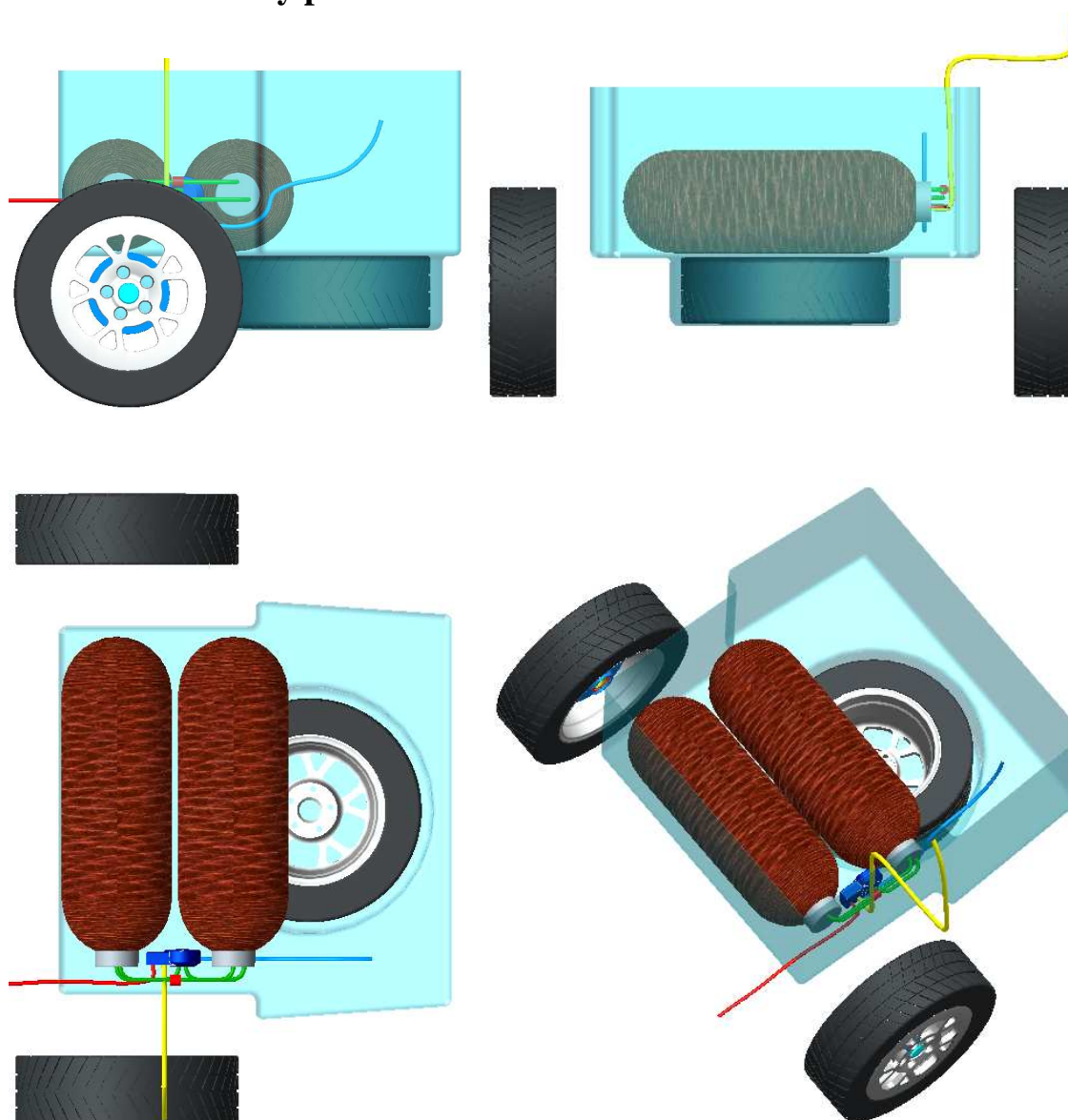
Hlavní agregáty (motor, palivové články, inverter, kondenzátory, převodovka, nádrže na vodík) jsem modeloval podle skutečných rozměrů udávaných výrobcí. Některé drobné agregáty jsem nemodeloval, protože se mi nepodařilo zjistit jejich rozměry. Ze zbylého prostoru však usuzuji, že by se do vozu vešly. Záměrně jsem proto nevyužil volný prostor po odebrání původní palivové nádrže.

3.4.1 Motorový prostor



Obrázek 3.17

3.4.2 Zavazadlový prostor



Obrázek 3.18

Z obrázků zavazadlového prostoru je patrné, že by při stávajícím umístění rezervního kola nebylo možné toto kolo vyndat. Proto navrhuji umístit rezervu zespoda, nebo použít takové pneumatiky (například s technologií Run Flat), aby rezerva ve vozidle nemusela být. V druhém případě by mohl být zavazadlový prostor hlubší a tím by se částečně svými rozměry přiblížil stávajícímu i přes umístění poměrně velkých nádrží na vodík.

3.5 Odhad hmotnosti vozidla

Tabulka 3.4

Odebrané agregáty	Přidané agregáty	
PSM s příslušenstvím		(-) 100 kg
Převodovka		(-) 35 kg
Palivová nádrž s příslušenstvím		(-) 15 kg
Katalyzátor, výfukové potrubí, tlumič výfuku		(-9)
	Motor A 300V100 MS včetně stálého převodu	(+) 108 kg
	Palivové články Mark 902	(+) 96 kg
	Invertor A 300V100 IN včetně DC/DC měniče	(+) 22 kg
	Převodovka	(+) 30 kg
	Palivová nádrž	(+) 88 kg
	Ultrakondenzátor včetně skříně	(+) 34 kg
	Další agregáty (ventily...)	(+) 10 kg
Součet		(+) 229 kg

Výrobce udává pohotovostní hmotnost automobilu Octavia Combi 1.4 MPI 55 KW v rozmezí 1245 až 1435 kg. Tento rozdíl je dán zvolenou výbavou vozu. U mnou navrženého vozidla volím tuto hmotnost na dolní hranici protože budu uvažovat základní výbavu. I přes základní výbavu bude hmotnost vozidla s palivovými články přibližně o 40 kg vyšší než hmotnost Octavie Combi 1.4 MPI s maximální možnou výbavou.

4 Stanovení očekávaných provozních parametrů vozidla

Očekávané provozní parametry jsem vesměs stanovil pomocí programu Matlab Simulink.

Účinnosti:

Při určování provozních parametrů je důležité zvolit správné hodnoty účinností. Tyto hodnoty se ovšem bez měření těžko získávají, protože výrobce často udává pouze jejich maximální hodnoty. Proto u většiny modelů uvádím výpis ze složky M-File, aby bylo možné dodatečně hodnoty upravit a nechat znovu přepočítat.

Tabulka 4.1 - účinnosti

Prvek	Maximální účinnost (udávaná výrobcem)	Zvolená účinnost
Motor	92%	82%
Palivové články	Dle polarizační křivky viz kapitola 3.2.2	Funkce nahrazující polarizační křivku
Invertor	97%	93%
Kondenzátorová baterie	98%	94%
Převodovka	-	94%

Použité vztahy v sestavených modelech:

- Valivý odpor: $F_f = m \cdot g \cdot f$ [N] (22)

- Odpor vzduchu: $F_a = \frac{1}{2} \cdot v^2 \cdot S \cdot \rho \cdot c_x$ [N] (23)

- Odpor proti zrychlení: $F_z = m \cdot \xi \frac{dv}{dt}$ [N] (24)

- Odpor stoupání: $F_\alpha = m \cdot g \cdot \sin(\alpha)$ [N] (25)

- Součinitel rotačních hmot: $\xi = 1 + \frac{I_{mot} \cdot i_{celk}^2 + 4 \cdot I_{kol}}{r_d^2 \cdot m}$ [1] (26)

$$\text{- Souč. rot. hmot na 1.stupeň: } \xi_I = 1.52 \text{ [1]} \quad (27)$$

$$\text{- Souč. rot. hmot na 2.stupeň: } \xi_I = 1.277 \text{ [1]} \quad (28)$$

$$\text{- Součinitel odporu valení: } f = 0.015 \text{ [1]} \quad (29)$$

4.1 Stanovení spotřeby paliva a dojezdu

K simulaci jsem použil evropský jízdní cyklus, který se používá k určení emisí škodlivin pro zkoušku typu I podle předpisu č.83 EHK. Tento cyklus jsem zvolil proto, že se při něm dopočítává spotřeba paliva z obsahu uhlíku ve výfukových plynech a já tak budu moci porovnat spotřebu mnou navrženého pohonu se spotřebou vyráběného vozu.

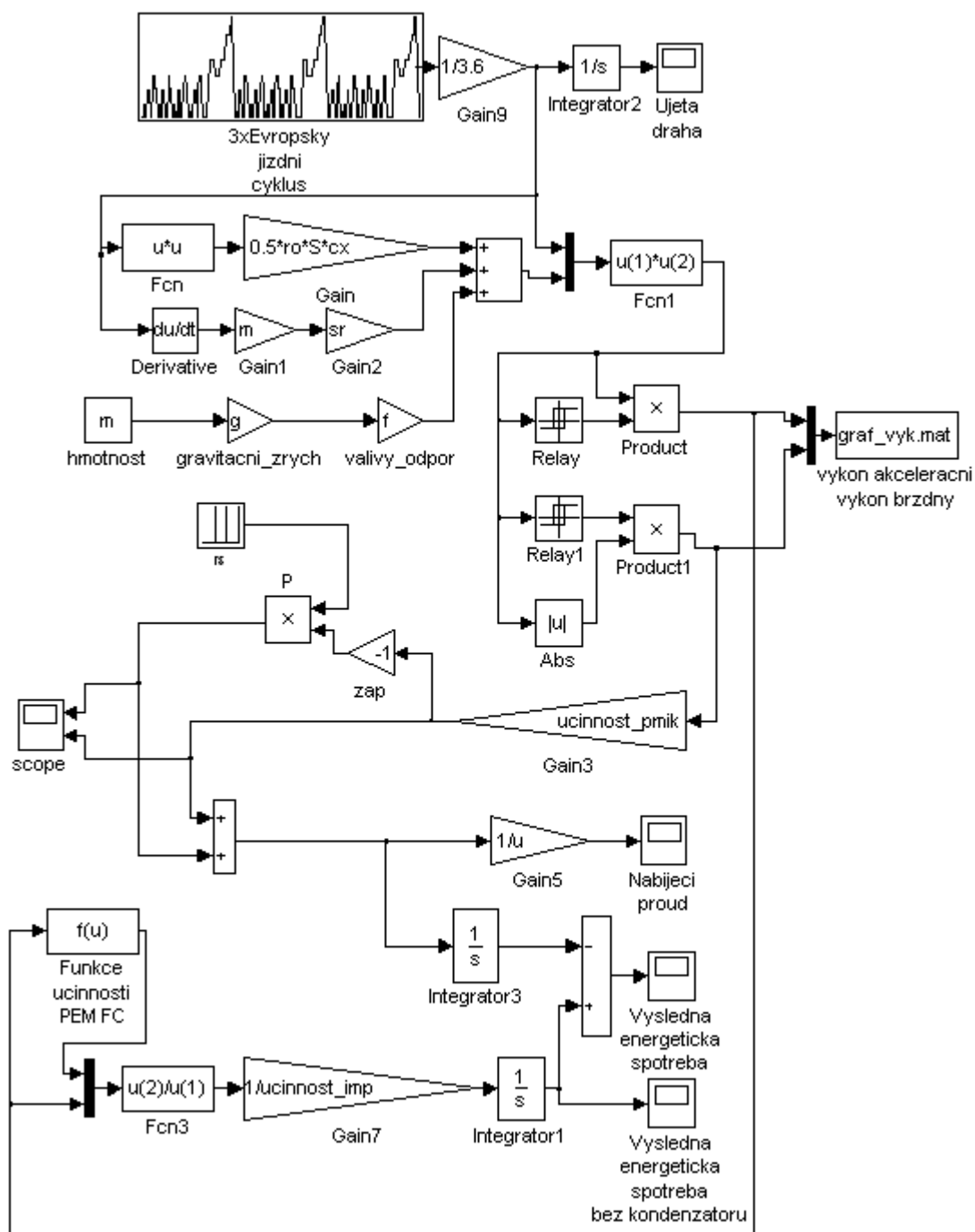
Výpis ze složky M-file:

```
m=1703 %hmotnost [kg] - hmotnost zkoušeného
vozu při měření emisí (1474kg)+ rozdíl hmotností přidaných
a odebraných agregátů (229kg)
cx=0.3 %součinitel odporu vzduchu [1]
ro=1.2 %hustota vzduchu [kg/m3]
S=2.23 %čelní plocha [m2]
sr=1.2 %součinitel rotačních hmot [1]
f=0.015 %součinitel odporu valení [1]
g=9.81 %gravitační zrychlení [m/s2]
ucinnost_pmik=0.67 %součin účinností
převodovky,motoru,invertoru a kondenzátorové baterie
ucinnost_imp=0.72 %součin účinností převodovky,motoru a
invertoru
k1=200 %pomocná časová konstanta
k2=400 %pomocná časová konstanta
k3=600 %pomocná časová konstanta
u=82.8 %nominální napětí kondenzátorové
baterie [V]
%hodnoty evropského jízdního cyklu:
%vektor času:
%[0 10 15 25 47 59 80 96 115 130 140 154 161 172 189 0+k1 10+k1
15+k1 25+k1
%47+k1 59+k1 80+k1 96+k1 115+k1 130+k1 140+k1 154+k1 161+k1
172+k1 189+k1
%0+k2 10+k2 15+k2 25+k2 47+k2 59+k2 80+k2 96+k2 115+k2 130+k2
140+k2 154+k2
%161+k2 172+k2 189+k2 0+k3 10+k3 15+k3 25+k3 47+k3 59+k3 80+k3
96+k3 115+k3
%130+k3 140+k3 154+k3 161+k3 172+k3 189+k3 849 890 926 940 1005
1023 1066
%1104 1129 1149 1162 1200]
%vektor rychlosti:
```

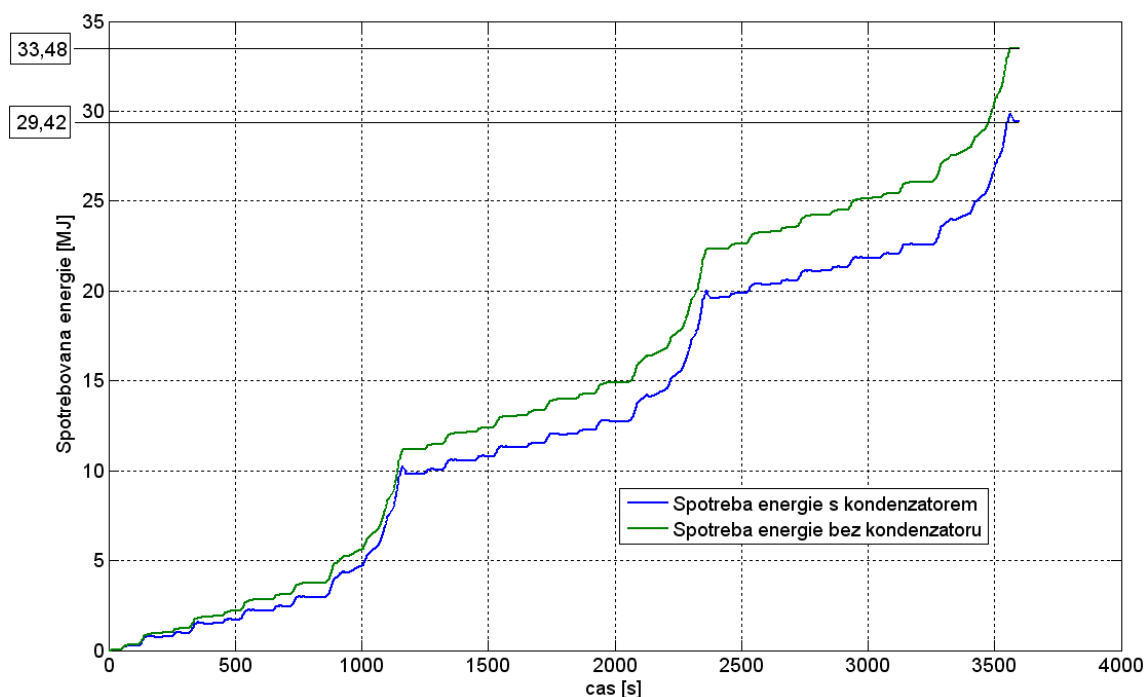
```

%[0 0 15 0 0 32 32 0 0 35 50 50 35 35 0 0 0 15 0 0 32 32 0 0 35
50 50 35 35
%0 0 0 15 0 0 32 32 0 0 35 50 50 35 35 0 0 0 15 0 0 32 32 0 0 35
50 50 35 35
%0 0 70 70 50 50 70 70 100 100 120 120 0]

```



Obrázek 4.1 - model v programu Matlab Simulink pro stanovení spotřeby paliva



Graf 4.1 - spotřebovaná energie

Z rozdílu spotřebované energie s rekuperačním systémem a bez něho je patrné, že se jeho instalace do vozidla vyplatí. Rozdíl činí přibližně 12 %. Takto vysoká hodnota je dána převážně městským průběhem cyklu. Během plynulé jízdy po dálnici by ušetřená energie byla o mnoho nižší.

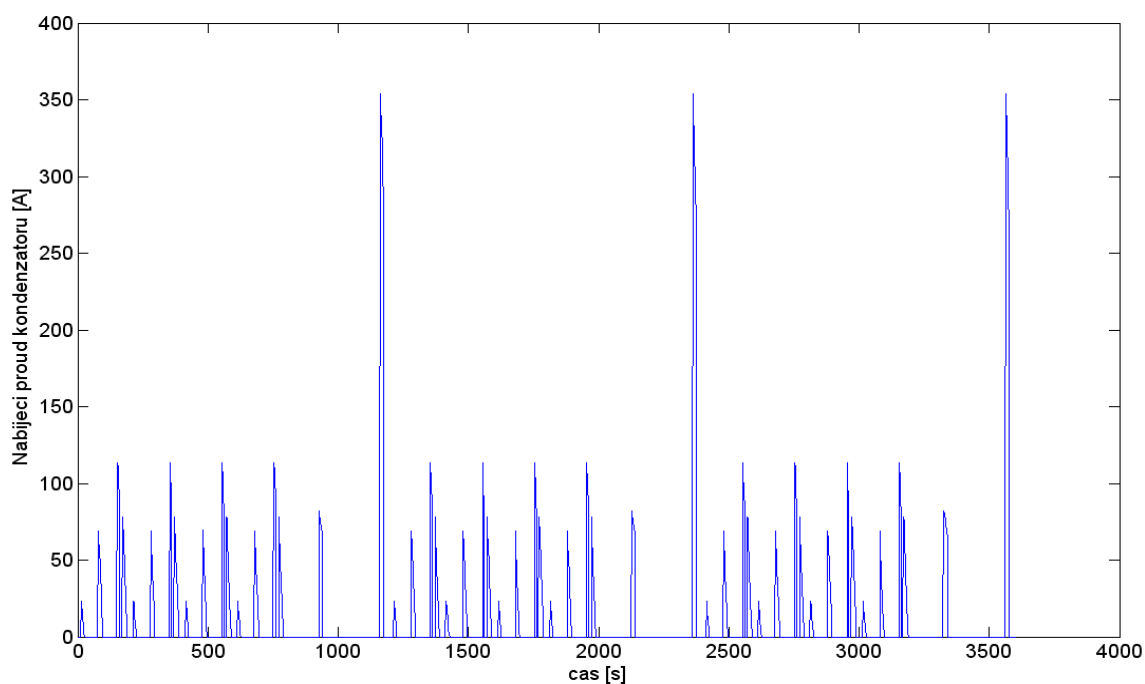
Při měrné energii vodíku 141,85 MJ/kg bude v průběhu celého testu spotřebováno 207,39 gramů vodíku. Ujetá dráha za celý test je 31,92 km. Z těchto hodnot vychází spotřeba vodíku 649,72 g/100km. Stejně množství energie jako v tomto množství vodíku je uchováno v 2,877 litrech benzínu.

Spotřeba benzínu Octavie Combi s motorem 1.4 MPI 55kW během stejného testu byla 7,03 litrů/100km (viz příloha 6).

Tabulka 4.2 - přepočtené spotřeby

Spotřeba	Udávaná výrobce[m ³ /100km]	přepočet	Ekvivalentní spotřeba benzínu [lit/100km]	Spotřeba vodíku[g/100km]
městský cyklus	9,6 - 9,8	$\frac{2,877}{7,03}$	3,93 - 4,01	888 - 905
mimo město	5,6 - 5,8		2,29 - 2,37	517 - 535
kombinovaná	7,0 - 7,2		2,86 - 2,95	646 - 666

K určení dojezdu budu počítat s kombinovanou spotřebou paliva. Hmotnost vodíku v plné nádrži je 2.88 kg. Dojezd automobilu s navrženým pohonem tedy bude 432 až 445 km. Ze všech provozních parametrů je u tohoto největší rozdíl ve srovnání s konvenčními automobily, které často dosahují hodnot dojezdu přes 800 km.



Graf 4.2 - průběh nabíjecího proudu

Z grafu nabíjecího proudu je patrné, že použití baterií k rekuperaci energie není možné z důvodu vysokých nabíjecích proudů a to i při poměrně velkém nominálním napětí (82,8V). Teoreticky jde kondenzátorem zachytit brzdňý výkon až 33,1 kW (82,8V*400A). Baterie mají tuto hodnotu řádově nižší.

4.2 Stanovení maximální rychlosti

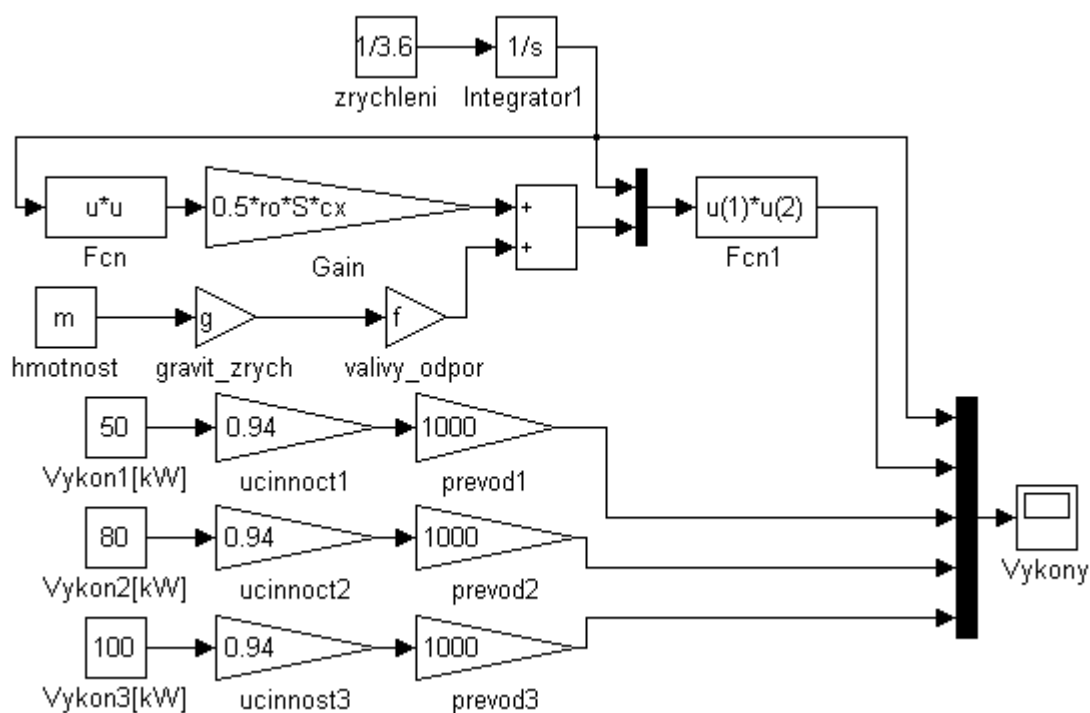
Dosažitelnou rychlost vozidla na rovině budu uvažovat pro tři hodnoty výkonu motoru:

- 50 kW – tento výkon je motor schopen dodávat velmi dlouhou dobu, protože pracuje bez momentového přetížení.

- 80 kW – tento výkon je dán hodnotou maximálního příkonu elektromotoru napájeného pouze z palivových článků. Při této hodnotě výkonu může motor pracovat několik minut.

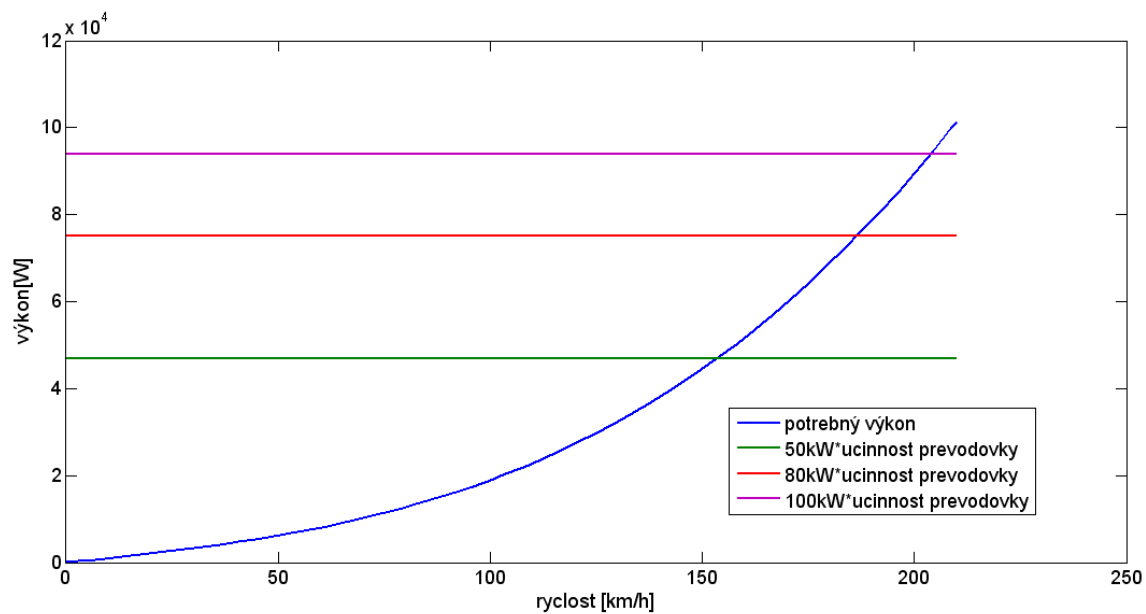
- 100 kW – tato hodnota je udávaná výrobcem jako maximální přetížení motoru. V tomto režimu musí být motor částečně napájen z kondenzátorů, proto tento stav může trvat pouze několik sekund.

Model v programu Matlab Simulink



Obrázek 4.2 - Model pro stanovení maximální rychlosti

U tohoto modelu je použit stejný M-file jako u modelu na stanovení spotřeby paliva, proto ho tu neuvádím.



Graf 4.3

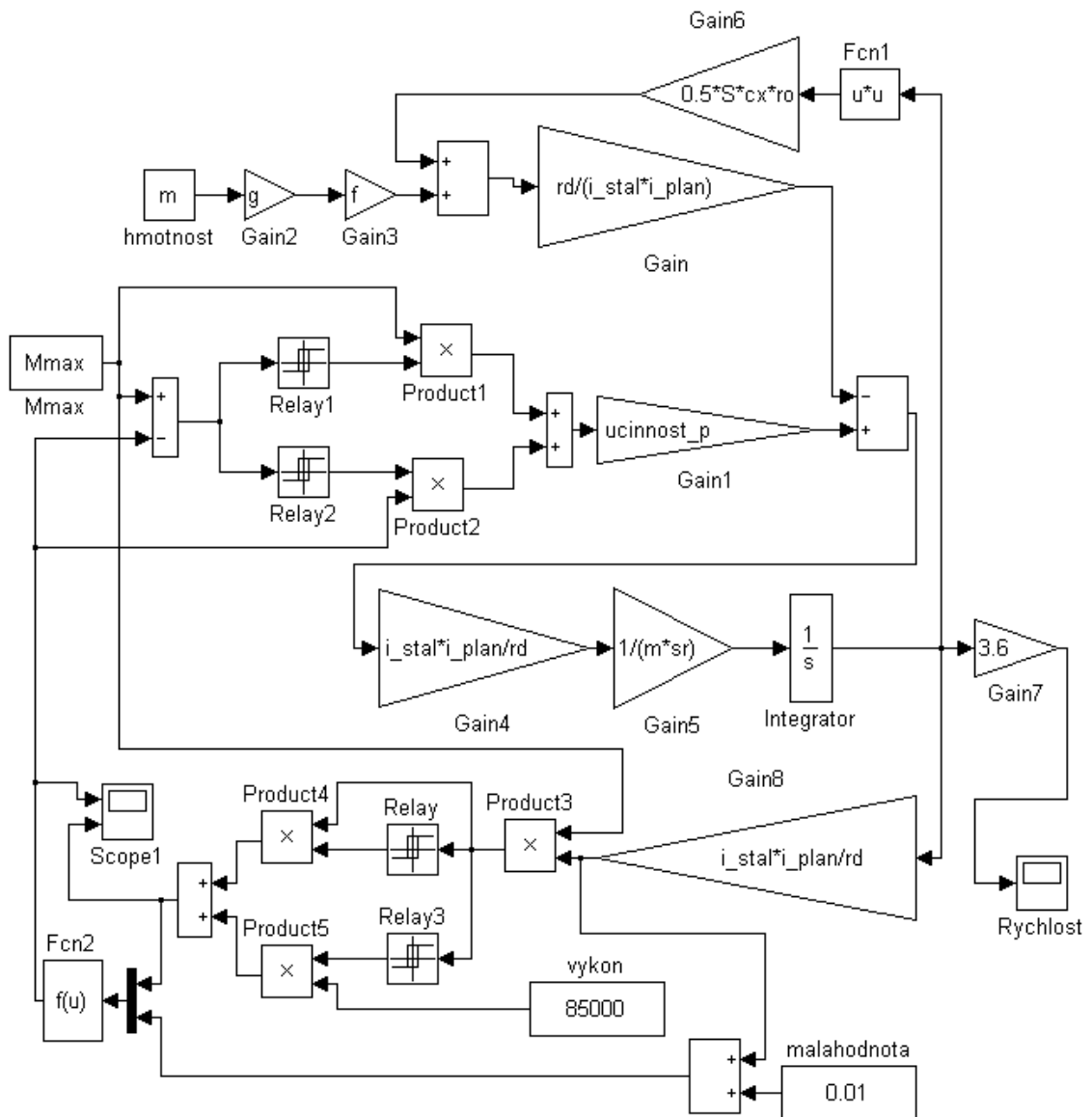
Výsledky:

Tabulka 4.3

Výkon motoru	Doba	Dosažitelná rychlost [km/h]
50 kW	Neomezeno motorem	153,5
80 kW	Několik minut	187
100 kW	Několik sekund	204

Teoreticky nejvyšší rychlosti (204) km/h by vozidlo při jízdě po rovině dosáhlo na velmi krátký okamžik. Proto jsem stálý převod zvolil tak, aby vozidlo dosáhlo maximálně rychlosti 180 km/h.

4.3 Stanovení maximálního zrychlení



Obrázek 4.3 - Model pro stanovení zrychlení

Výpis z M-File:

```

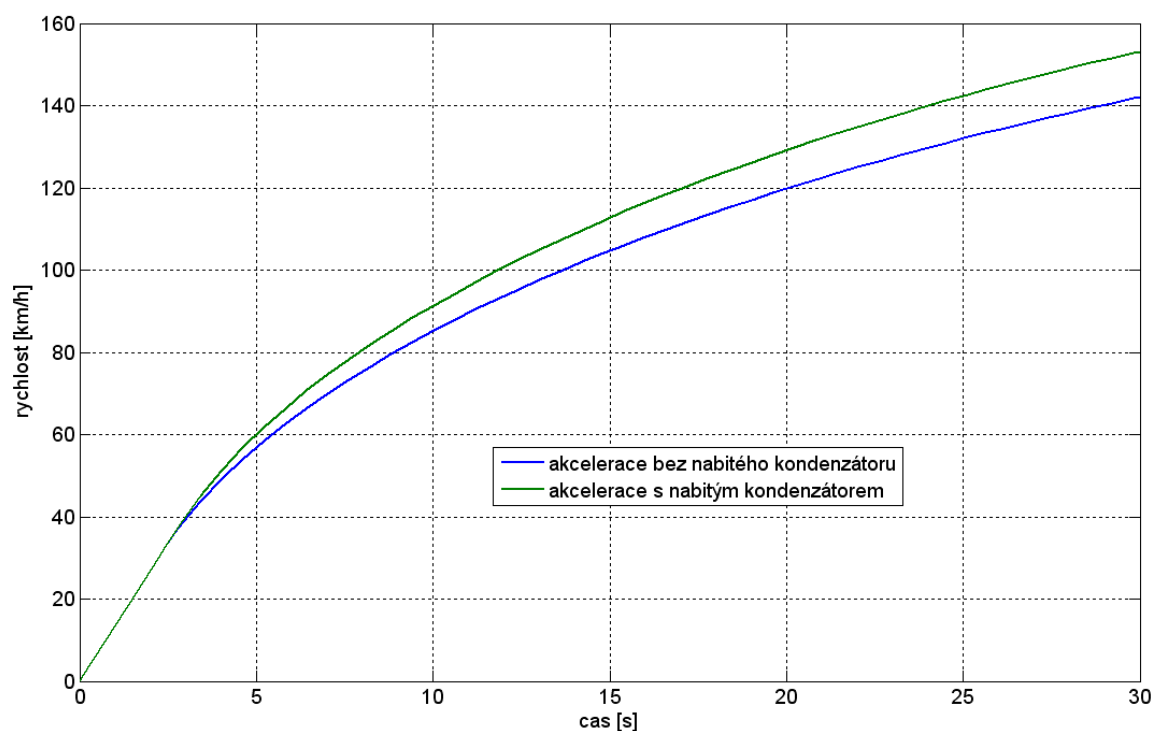
Mmax=230;           %Maximální moment motoru [Nm]
m=1703;             %Hmotnost [kg]
g=9.81;             %Gravitační zrychlení [m/s²]
f=0.015;            %Součinitel odporu valení [1]
rd=0.3;             %Dynamický poloměr kola [m]
i_stal=8.482;       %Stálý převod [1]
i_plan=1.4769;      %Převodový poměr planetové převodovky [1]
cx=0.3;             %součinitel odporu vzduchu [1]

```

```

ro=1.2;           %hustota vzduchu [kg/m3]
S=2.23;           %čelní plocha [m2]
sr=1.2;           %součinitel rotačních hmot [1]
ucinnost_p=0.94; %Účinnost převodovky [1]

```



graf 4.4

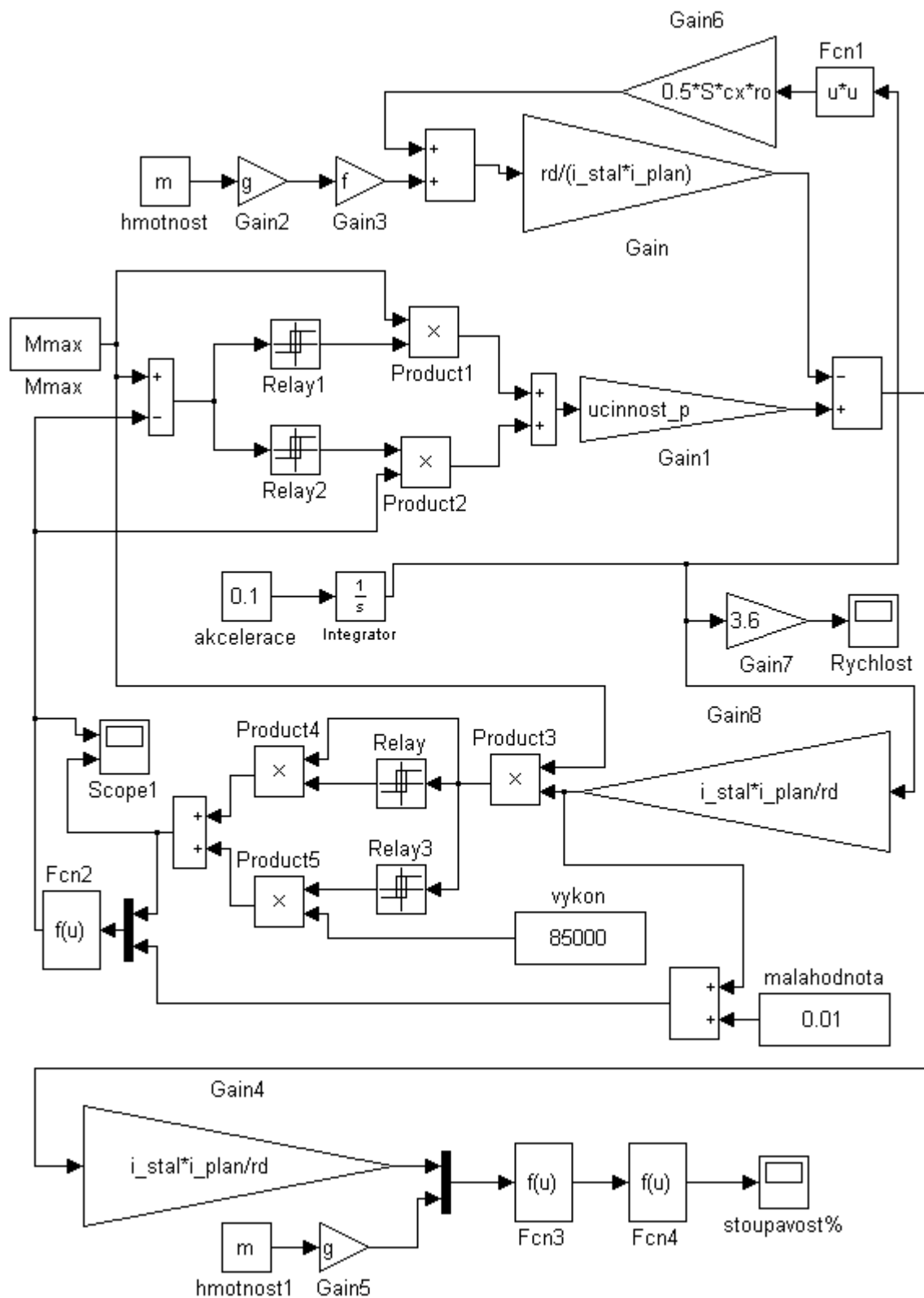
Výsledky:

Tabulka 4.4

Rychlosti	Čas s nabitým kondenzátorem	Čas s nenabitým kondenzátorem	Octavia Combi 1.4 MPI 55 KW
0 - 100 km/h	11,5 s	13,3 s	15,7 s
40 - 100 km/h	8,6 s	10,3 s	
60 - 120 km/h	11,7	14,3s	

Poměrně dobré časy, jsou dány možností pohonu akcelarovat krátký okamžik s maximálním přetížením motoru jehož příkon může být po tuto dobu pokryt současně z palivových článků (max. 85 kW) a kondenzátorů (max. 33 kW). Dalším důvodem takto dobrých výsledků je jízda bez zařazení druhého převodového stupně , které teoreticky není zapotřebí do rychlosti 122 km/h.

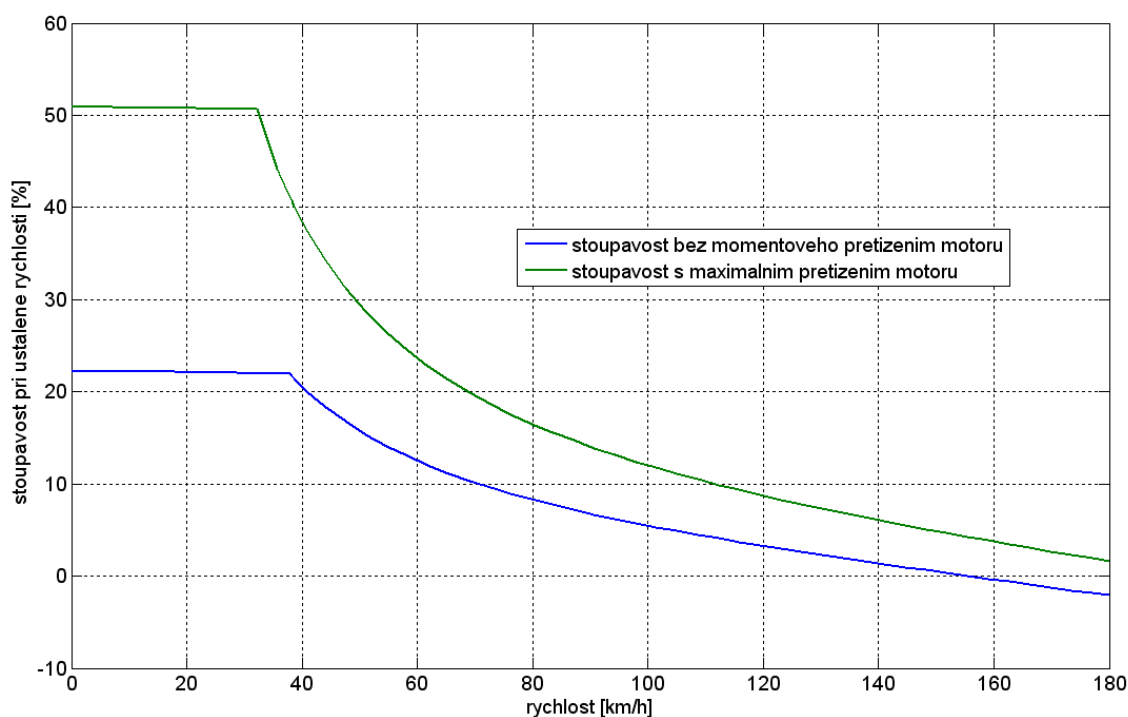
4.4 Stanovení maximální stoupavosti



Obrázek 4.4 - Model pro stanovení stoupavosti

Výpis z M-File:

```
Mmax=230; %Maximální moment motoru [Nm]
Mstal=115; %Moment motoru bez pretížení [Nm]
m=1945; %Hmotnost [kg]
g=9.81; %Gravitační zrychlení [m/s2]
f=0.02; %Odpor valení [1]
rd=0.3; %Dynamický poloměr kola [m]
i_stal=8.486; %Stálý převod [1]
i_plan=1.477; %Převodový poměr planetové převodovky [1]
cx=0.3; %součinitel odporu vzduchu [1]
ro=1.2; %hustota vzduchu [kg/m3]
S=2.23; %čelní plocha [m2]
ucinnost_p=0.94; %Účinnost převodovky [1]
```



Graf 4.5 - stoupavost při celkové hmotnosti 1945kg

Automobil s navrženým pohonem má při maximálním přetížení motoru velmi dobrou stoupavost. Nejvyšší hodnota stoupavosti porovnávaného automobilu Octava Combi je 35%.

5 Závěr

Vozidla s elektrickým pohonem a palivovými články na vodík jsou ve srovnání s automobily s PSM na počátku svého vývoje. Proto jim v některých vlastnostech zatím nemohou konkurovat. Jedná se především o vyšší požadavky na zástavbu při stejném výkonu, problém vzniklý poměrně nízkou energetickou hustotou stlačeného vodíku, možnost poškození palivových článků při velmi nízkých teplotách Některé nevýhody, jako je nesrovnatelně nižší hustota čerpacích stanic a servisů, ve kterých by bylo možné takové vozidlo opravit, jsou zapříčiněné velmi dlouhou dobou používání vozidel s PSM. Z těchto důvodů bude případný přechod na vozidla s elektrickým pohonem pozvolný a může trvat desítky let.

Na druhou stranu má elektrický pohon mnoho významných výhod, mezi něž patří produkování nulového množství škodlivin při provozu, menší závislost na ubývajících fosilních palivech, vyšší celková účinnost pohonu (až okolo 50-ti %) daná jednoduchou rekuperací energie a poměrně vysokou účinností použitých agregátů.

Přínosem diplomové práce je, že se mi povedlo vyřešit zástavbu již vyráběných agregátů, s nimiž jsou odhadnuté provozní parametry automobilu srovnatelné s parametry současných vozů. Dalším přínosem by mohl být návrh konstrukce poměrně jednoduché převodovky, která dobře doplňuje použitý elektromotor, a s jejímž konstrukčním uspořádáním jsem se dosud nesetkal.

Záměrně se v práci nezabývám finanční analýzou navrženého pohonu, protože by srovnání ceny tohoto prototypu s velkosériově vyráběným vozem nemuselo být objektivní. Důvodem je hlavně těžko odhadnutelný vývoj cen použitých agregátů.

Seznam použité literatury:

Internetové stránky:

http://hydrogenix.vsb.cz/teorie/2.kapitola.html#_Toc98486016

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Rozdělení palivových článků
Příloha 2	Zvolený motor A 300V100 MS
Příloha 3	Palivové články Mark 902
Příloha 4	Invertor A 300V100 IN
Příloha 5	Kondenzátor UltraCap 450F/14V
Příloha 6	Protokol o měření emisí škodlivin (Škoda Auto, a.s.)
KSD-DP-508-01	Skica převodovky
KSD-DP-508-02	Skica zástavby agregátů
CD nosič	